



**Gonçalo Carlos Rosário da Costa**

Licenciado em Ciências de engenharia Civil

# **A CONTRIBUIÇÃO DOS SISTEMAS SOLARES TÉRMICOS E FOTOVOLTAICOS PARA O BALANÇO ENERGÉTICO DOS EDIFÍCIOS RESIDENCIAIS UNIFAMILIARES**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia  
Civil – Perfil de Construio

Orientador: Prof. Doutor Daniel Aelenei, FCT/UNL  
Co-orientador: Doutora Susana Filipa Almeida Castro Viana, LNEG

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Nuno Manuel da Costa Guerra  
Arguente: Engenheiro João Farinha Mendes  
Vogais: Prof. Doutor Daniel Aelenei  
Doutora Susana Filipa Almeida Castro Viana



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Julho, 2012**



**Gonçalo Carlos Rosário da Costa**

Licenciado em Ciências de engenharia Civil

**A CONTRIBUIÇÃO DOS SISTEMAS SOLARES  
TÉRMICOS E FOTOVOLTAICOS PARA O BALANÇO  
ENERGÉTICO DOS EDIFÍCIOS RESIDENCIAIS  
UNIFAMILIARES**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia  
Civil – Perfil de Construi  o

Orientador: Prof. Doutor Daniel Aelenei, FCT/UNL  
Co-orientador: Doutora Susana Filipa Almeida Castro Viana, LNEG

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Nuno Manuel da Costa Guerra  
Arguente: Engenheiro João Farinha Mendes  
Vogais: Prof. Doutor Daniel Aelenei  
Doutora Susana Filipa Almeida Castro Viana



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Julho, 2012**



“Copyright” Gonçalo Carlos Rosário da Costa, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa tem o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



## **AGRADECIMENTOS**

Expresso aqui o meu agradecimento a todos aqueles, que de alguma forma, contribuíram, directa ou indirectamente, para o desenvolvimento deste trabalho, em particular:

Ao Professor Daniel Aelenei, Orientador científico desta dissertação, e à Eng<sup>a</sup> Susana Viana, Co-orientadora científica, pelo apoio, incentivo e orientação do trabalho, bem como pela disponibilidade demonstrada e por todos os ensinamentos transmitidos.

A todos os meus colegas e amigos que pelo apoio e disponibilidade durante a realização deste trabalho, bem como durante todo o meu percurso académico.

À Ana, pelo incentivo constante e enorme paciência.

Aos meus pais e restante família pelo apoio incondicional e incentivo durante a realização deste trabalho, bem como durante todo o meu percurso académico.





# A contribuição dos sistemas solares térmicos e fotovoltaicos para o balanço energético dos edifícios residenciais unifamiliares

## RESUMO

O tema abordado na presente dissertação, desenvolvida no Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa (DEC – FCT/UNL), visa estudar a contribuição em termos energéticos da integração de sistemas solares activos (térmicos e fotovoltaicos) em edifícios, com vista a suprir as suas necessidades de aquecimento ( $N_{ic}$ ), de arrefecimento ( $N_{vc}$ ) e de preparação de águas quentes sanitárias (AQS) ( $N_{ac}$ ) de acordo com o regulamento das características de comportamento térmico dos edifícios (RCCTE). Esta análise pretende ainda averiguar a hipótese de alcance do balanço energético nulo ou quase nulo nos termos indicados pela EPBD.

Para tal, numa primeira fase, faz-se uma abordagem geral do tema em análise recorrendo para o efeito a uma pesquisa bibliográfica. Esta pesquisa incidiu sobre os diferentes tipos de energias renováveis de possível aplicação e utilização em edifícios habitacionais, bem como sobre os programas de simulação existentes para os sistemas a utilizar e sobre as bases teóricas dos programas utilizados no trabalho numérico.

Na segunda fase do estudo, fazem-se diversas simulações com recurso às ferramentas computacionais PVsyst e SolTerm para estimar o potencial energético dos sistemas solares activos para um conjunto largo de soluções. Os resultados obtidos são apresentados, analisados e comparados tendo em conta os objectivos inicialmente definidos.

Através do trabalho desenvolvido e apresentado foi possível concluir que os edifícios de balanço energético nulo ou quase nulo são alcançáveis mesmo para edifícios com baixos requisitos de eficiência energética e para diversas localidades no panorama nacional.

**Palavras-Chave:** Edifícios de balanço energético nulo (*nZEB*); Energias renováveis; Sistema solar fotovoltaico; Sistema solar térmico; PVsyst; SolTerm.



The contribution of photovoltaic and thermal solar systems on the energy balance of  
single-family residential buildings

## ABSTRACT

This theme, developed in the Department of Civil Engineering at the Faculty of Sciences and Technology of the New University of Lisbon, aims to deepen the knowledge concerning the contribution of integrating photovoltaic and thermal systems on residential buildings. This integration is made with the objective of canceling out the heating ( $N_{ic}$ ), cooling ( $N_{vc}$ ) and water heating ( $N_{ac}$ ) needs obtained according to the Thermal Performance Building Code (RCCTE) of the building, with the purpose of obtaining a Net-Zero Energy Building (nZEB).

To this end, initially, a general approach to the subject is done, using to this purpose a literature review. This research focused on the existing types of renewable energy sources with potential usage in residential buildings, the existing simulation tools to simulate these solar systems and the background of the tools used for this numerical work.

On the second part of the study several simulations are done using computational tools as the PVsyst and SolTerm to evaluate the energy potential of various active solar system solutions. The results are presented, analyzed and compared taking in account the objectives initially set.

By the study developed and presented it was concluded that the zero or net-zero energy buildings are achievable even for buildings with low energy requirements and applied to various locations on the national scene.

**Keywords:** Net Zero Energy Buildings (nZEB); Renewable Energies; Photovoltaic Solar System; Thermal Solar System; PVsyst; SolTerm.



# ÍNDICE DE MATÉRIAS

## CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO

1.1-	Considerações iniciais .....	1
1.2-	Objectivos e metodologia da dissertação .....	2
1.3-	Organização da dissertação.....	2

## CAPÍTULO II – ENQUADRAMENTO GLOBAL DO TEMA

2.1-	Considerações iniciais .....	5
2.2-	Conceito de “ <i>Net-Zero Energy Buildings</i> ” .....	5
2.3-	Net-Zero Energy Buildings.....	7
2.4-	Energias renováveis .....	10
2.4.1 -	Bioenergia .....	12
2.4.2 -	Energia Hídrica ou Hidráulica .....	13
2.4.3 -	Energia Oceânica .....	13
2.4.4 -	Energia Geotérmica .....	15
2.4.5 -	Energia Eólica .....	15
2.4.6 -	Energia Solar .....	17
2.5-	Potencial de aproveitamento dos sistemas solares para obtenção de edifícios “ <i>net-zero energy</i> ” .....	23
2.5.1 -	Sistema Solar Fotovoltaico .....	23
2.5.1.1 -	Condições de referência .....	25
2.5.1.2 -	Tipos de células de módulos fotovoltaicos .....	26
2.5.1.3 -	Características I-V e P-V .....	33
2.5.1.4 -	Influência da temperatura e da irradiância .....	34
2.5.1.5 -	Sistemas ligados à rede .....	35
2.5.2 -	Sistema Solar Térmico.....	38
2.5.2.1 -	Colectores solares .....	38
2.5.2.2 -	Depósitos de armazenamento .....	45
2.5.2.3 -	Circuito Solar.....	45

## CAPÍTULO III - ENQUADRAMENTO DO TRABALHO NUMÉRICO

3.1-	Considerações iniciais .....	49
3.2-	Ferramentas de simulação existentes .....	49
3.2.1-	SolTerm.....	51
3.2.2-	PVsyst .....	55

---

## **CAPÍTULO IV – TRABALHO NUMÉRICO**

4.1- Considerações iniciais .....	59
4.2- Metodologia de simulação .....	59
4.2.1 - Simulação do sistema solar fotovoltaico .....	60
4.2.1.1 - Definição do projecto e da localização do edifício .....	62
4.2.1.2 - Definição da orientação e inclinação dos módulos fotovoltaicos .....	62
4.2.1.3 - Definição de sombreamentos distantes .....	63
4.2.1.4 - Caracterização do edifício e de todos os componentes .....	63
4.2.1.5 - Caracterização dos componentes do sistema solar fotovoltaico .....	66
4.2.1.6 - Definição da disposição eléctrica dos módulos fotovoltaicos .....	70
4.2.2 - Simulação do sistema solar térmico .....	70
4.2.2.1 - Identificação do local e descrição da envolvente do sistema .....	70
4.2.2.2 - Definição dos componentes do sistema solar térmico .....	71
4.2.2.3 - Análise energética .....	74
4.3- Apresentação e discussão de resultados .....	74
4.3.1 - Necessidades nominais de energia .....	74
4.3.2 - Simulação do sistema solar fotovoltaico .....	78
4.3.3 - Simulação do sistema solar térmico .....	88
4.4- Análise de resultados .....	91
4.4.1- Comparação em termos de energia final .....	91
4.4.2- Comparação em termos de energia primária .....	93
4.4.3- Comparação em termos de emissões equivalentes de CO <sub>2</sub> .....	98

## **CAPÍTULO V – CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES.**

### **DESENVOLVIMENTOS FUTUROS**

5.1- Considerações iniciais .....	103
5.2- Conclusões e comentários finais .....	103
5.3- Desenvolvimentos futuros .....	104

### **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....105**

### **ANEXO I – CÁLCULOS DE VERIFICAÇÃO DE ARRANJO FOTOVOLTAICO .....109**

<b>ANEXO II – QUADROS RESUMO DAS PERDAS DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS, QUADROS COM OS VALORES DETALHADOS DAS COMPARAÇÕES NECESSIDADES VERSUS PRODUÇÃO .....</b>	<b>113</b>
<b>ANEXO III – RELATÓRIOS DE SIMULAÇÃO DO PVSYST .....</b>	<b>119</b>

---



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Método de obtenção de balanço energético nulo.....	7
Figura 2.2: Produção de energia mundial (2008).....	10
Figura 2.3: Perspectivas futuras de procura energética.....	11
Figura 2.4: Evolução das emissões de CO <sub>2</sub> relativo ao ano de 1990.....	11
Figura 2.5: Esquema de funcionamento do sistema de coluna de água oscilante.....	14
Figura 2.6: Sistema de Pelamis.....	14
Figura 2.7: Sistema passivo de bomba de calor geotérmica.....	15
Figura 2.8: Atlas do Vento Português.....	16
Figura 2.9: Microgerador eólico – TURBAN com potência de 2.5kW.....	17
Figura 2.10: Radiação solar global e as suas componentes.....	18
Figura 2.11: Irradiação solar global para diferentes condições do céu.....	18
Figura 2.12: Irradiação global anual em Portugal Continental.....	19
Figura 2.13: Insolação global anual em Portugal Continental.....	19
Figura 2.14: Irradiação solar global para diferentes orientações da superfície receptora.....	20
Figura 2.15: Tipos de concentradores solares e esquema simplificado de um sistema solar termoelectrico de concentração.....	21
Figura 2.16: Esquema exemplificativo de funcionamento de um sistema solar.....	22
Figura 2.17: Esquema geral de funcionamento de uma célula solar.....	24
Figura 2.18: Esquema exemplificativo dos tipos de células convencionais.....	26
Figura 2.19: Esquema exemplificativo dos tipos de compostos dos módulos fotovoltaicos de filme fino.....	26
Figura 2.20: Células de silício monocristalino.....	27
Figura 2.21: Células de silício policristalino .....	28
Figura 2.22: Tipos de Módulos Cristalinos.....	28
Figura 2.23: Diferenças de consumos na produção de células cristalinas e de filme fino....	29
Figura 2.24: Células de silício amorfo .....	30
Figura 2.25: Módulos CIS.....	31
Figura 2.26: Módulos de Telureto de Cádmio.....	32
Figura 2.27: Curvas características I-V e P-V de um sistema fotovoltaico.....	33
Figura 2.28: Influência da temperatura em células fotovoltaicas na curva característica I-V	34
Figura 2.29: Influência da Irradiância em células fotovoltaicas na curva característica I-V.	35
Figura 2.30: Componentes de um sistema fotovoltaico com ligação à rede.....	36

Figura 2.31: Caixa de junção geral do gerador.....	36
Figura 2.32: Símbolo eléctrico para o inversor.....	37
Figura 2.33: Esquema simplificativo de um colector solar plano.....	39
Figura 2.34: Secção transversal com a descrição das diferentes áreas das superfícies.....	39
Figura 2.35: Absorção ( $\alpha$ ) e emissão através de superfícies diferentes.....	40
Figura 2.36: Tipos de Absorsores.....	41
Figura 2.37: Esquema funcional de um colector plano.....	42
Figura 2.38: Funcionamento de um colector do tipo CPC.....	43
Figura 2.39: Collectores de tubos de vácuo.....	44
Figura 2.40: Sistema termossifão.....	47
Figura 3.1: Exemplo do interface e valores apresentados na escolha do local.....	53
Figura 3.2: Esquema dos sistemas primário e secundário do SolTerm.....	54
Figura 3.3: Exemplo da análise energética do SolTerm.....	55
Figura 3.4: Apresentação do interface geral do PVsyst.....	56
Figura 3.5: Exemplo da ferramenta de desenho do sistema fotovoltaico e da animação de verificação de sombreamentos.....	57
Figura 3.6: Exemplo de um diagrama de perdas obtido através do PVsyst.....	57
Figura 4.1: Modelo ilustrativo do processo de simulação de sistemas fotovoltaicos através do programa PVsyst.....	61
Figura 4.2: Campo “ <i>Project</i> ” do PVsyst com exemplo de diferentes variantes de um projecto.....	62
Figura 4.3: Campo “ <i>Orientation</i> ” do PVsyst com optimização de inclinação.....	63
Figura 4.4: Esquema ilustrativo das séries afectadas por acumulação de sujidade em diferentes situações de instalação.....	64
Figura 4.5: Gráfico de sombreamentos para Lisboa solução Fluitechnik FTS 280P.....	65
Figura 4.6: Interface “ <i>Shading/optimisation of sheds</i> ” para Lisboa solução Fluitechnik FTS 280P.....	65
Figura 4.7: Diagrama do factor de sombreamento ao longo do ano.....	66
Figura 4.8: Esquema do edifício definido no programa PVsyst.....	66
Figura 4.9: Janela de definição das perdas térmicas.....	68
Figura 4.10: Interface de definição dos comprimentos e secções dos cabos eléctricos.....	69
Figura 4.11: Interface “ <i>System</i> ”.....	69
Figura 4.12: Modelo ilustrativo do processo de simulação de sistemas solares térmicos através do programa SolTerm.....	70
Figura 4.13: Janela de definição dos detalhes do local no SolTerm.....	71

Figura 4.14: Definição dos colectores solares no programa SolTerm.....	72
Figura 4.15: Editor de tanques de armazenamento / permutadores do SolTerm.....	73
Figura 4.16: Características do consumo do SolTerm.....	73
Figura 4.17: Exemplo das áreas disponíveis para a colocação dos módulos fotovoltaicos e do colector solar térmico.....	79
Figura 4.18: Valores de produção anual com módulos fotovoltaicos de silício monocristalino.....	79
Figura 4.19: Valores de produção anual com módulos fotovoltaicos de silício policristalino.....	80
Figura 4.20: Valores de produção anual por potência nominal com módulos fotovoltaicos de silício monocristalino.....	81
Figura 4.21: Valores de produção anual por potência nominal com módulos fotovoltaicos de silício policristalino.....	82
Figura 4.22: Valores de produção anual por metro quadrado de módulo para a tecnologia de silício monocristalino.....	83
Figura 4.23: Valores de produção anual por metro quadrado de módulo para a tecnologia de silício policristalino.....	83
Figura 4.24: Valores de produção anual por metro quadrado de pavimento com módulos fotovoltaicos de silício monocristalino.....	84
Figura 4.25: Valores de produção anual por metro quadrado de pavimento com módulos de silício policristalino.....	85
Figura 4.26: Rácio de desempenho dos módulos de silício monocristalino.....	86
Figura 4.27: Rácio de desempenho dos módulos de silício policristalino.....	87
Figura 4.28: Comparação entre produção e necessidades de energia final sem contabilização da energia produzida pelo colector solar.....	92
Figura 4.29: Comparação entre produção e necessidades de energia final tendo em conta a produção do colector solar.....	93
Figura 4.30: Comparação entre necessidades globais anuais nominais de energia primária e produção de energia primária (sem colector, com electricidade) .....	94
Figura 4.31: Comparação entre necessidades globais anuais nominais de energia primária e produção de energia primária (sem colector, com electricidade e gás natural) .....	95
Figura 4.32: Comparação entre necessidades globais anuais nominais de energia primária e produção de energia primária considerando produção do colector solar (com electricidade) .....	96

---

Figura 4.33: Comparação entre necessidades globais anuais nominais de energia primária e produção de energia primária considerando produção do colector solar (com electricidade e gás natural) .....	96
Figura 4.34: Comparação entre necessidades globais anuais nominais de energia primária e produção de energia primária para todas as localidades e soluções.....	97
Figura 4.35: Comparação entre necessidades globais anuais nominais de energia em emissões equivalentes de CO <sub>2</sub> e produção de energia em emissões equivalentes de CO <sub>2</sub> considerando produção do colector solar (com electricidade).....	100
Figura 4.36: Comparação entre necessidades globais anuais nominais de energia em emissões equivalentes de CO <sub>2</sub> e produção de energia em emissões equivalentes de CO <sub>2</sub> considerando produção do colector solar (com electricidade e gás natural).....	100
Figura I.1: Esquema exemplificativo de um sistema de sete módulos em série e duas séries em paralelo.....	111

## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1: Resumo das vantagens e desvantagens das definições de <i>nZEB</i> .....	6
Quadro 2.2: Tipos de energias renováveis existentes.....	12
Quadro 2.3: Tecnologias das fontes de energia renováveis e respectivos usos.....	12
Quadro 2.4: Condições de referência STC.....	25
Quadro 2.5: Quadro resumo dos rendimentos das diversas células fotovoltaicas.....	32
Quadro 2.6: Principais funções dos inversores.....	37
Quadro 4.1: Resumo das tecnologias, fabricantes e modelos utilizados.....	67
Quadro 4.2: Valores de rendimentos dos módulos fotovoltaicos.....	67
Quadro 4.3: Valor do número de graus-dia e das necessidades nominais de energia útil para aquecimento.....	75
Quadro 4.4: Zonas climáticas e valores das necessidades nominais de energia útil para arrefecimento.....	76
Quadro 4.5: Valores de necessidades de energia final total.....	77
Quadro 4.6: Necessidades globais nominais específicas de energia primária.....	78
Quadro 4.7: Valores de produção anual com módulos fotovoltaicos de silício amorfo.....	80
Quadro 4.8: Valores obtidos através da simulação no programa SolTerm de quatro colectores do tipo “padrão”.....	88
Quadro 4.9: Valores de necessidades de energia para preparação de AQS tendo em conta os valores de produção obtidos através do SolTerm.....	89
Quadro 4.10: Valores de necessidades de energia final total considerando a produção do colector solar.....	90
Quadro 4.11: Necessidades globais anuais nominais específicas de energia primária.....	90
Quadro 4.12: Balanços energéticos por localidade e solução.....	98
Quadro 4.13: Necessidades globais anuais nominais específicas de energia em emissões equivalentes de CO <sub>2</sub> .....	99
Quadro II.1: Valores das perdas existentes nos sistemas fotovoltaicos monocristalinos.....	115
Quadro II.2: Valores das perdas existentes nos sistemas fotovoltaicos policristalinos.....	116
Quadro II.3: Valores das necessidades totais de energia final sem colector solar e de produção fotovoltaica.....	117
Quadro II.4: Valores das necessidades totais de energia final com colector solar e de produção fotovoltaica.....	117

---

Quadro II.5: Valores das necessidades nominais de energia primária e de produção fotovoltaica equivalente em energia primária.....	118
Quadro II.6: Valores das necessidades nominais de energia em emissões de CO <sub>2</sub> e de produção fotovoltaica de energia em emissões de CO <sub>2</sub> .....	118

## **SIMBOLOGIA**

### **SIGLAS**

AC – Corrente Alternada

AMR – Anos Meteorológicos de Referência

AQS – Águas Quentes Sanitárias

AR – Anti-Reflexão

BIPV – Building Integrated Photovoltaics (Fotovoltaicos Integrados em Edifícios)

CPC – Colector Parabólico Composto

CEN – Comité Européen de Normalisation (Comité Europeu de Normalização)

DC – Corrente Contínua

DEC – Departamento de Engenharia Civil

DOE – U.S. Department of Energy (Departamento de Energia dos Estados Unidos)

EN – Norma Europeia

ENE – Estratégia Nacional de Energia

EPBD – Directiva Europeia para o Desempenho Energético de Edifícios

FCT – Faculdade de Ciências e Tecnologia

FER – Fontes de Energia Renovável

IEA – International Energy Agency (Agência Internacional de Energia)

INETI – Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação

LNEG – Laboratório Nacional de Energia e Geologia

MPP – Ponto de Potência Máxima

nZEB – Net Zero-Energy Buildings (Edifícios de Balanço Energético Nulo)

PNAEE – Plano Nacional de Acção para a Eficiência Energética

PNAER – Plano Nacional de Acção para Energias Renováveis

PR – Performance Ratio (Rácio de Desempenho)

RCCTE – Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios

RESP – Rede Eléctrica de Serviço Público

RSECE – Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios

SCE – Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios

STC – Standard Test Conditions

UE – União Europeia

UNL – Universidade Nova de Lisboa

---

## NOTAÇÕES ESCALARES LATINAS

$A$  – Área da célula fotovoltaica ( $\text{m}^2$ )

$AM$  – Massa de ar (-)

$A_{\text{ext}}$  – Área da envolvente exterior ( $\text{m}^2$ )

$A_{\text{int}}$  – Área da envolvente interior ( $\text{m}^2$ )

$A_p$  – Área de pavimento ( $\text{m}^2$ )

$E_{AC}$  – Energia total entregue à rede eléctrica (kWh/ano)

$E_{\text{dif}}$  – Radiação solar reflectida na superfície terrestre ( $\text{W}/\text{m}^2$ )

$E_{\text{dir}}$  – Radiação solar directa ( $\text{W}/\text{m}^2$ )

$E_G$  – Radiação solar global ( $\text{W}/\text{m}^2$ )

$E_{\text{ref}}$  – Radiação solar reflectida ( $\text{W}/\text{m}^2$ )

$E_{\text{SOLAR}}$  – Contribuição de sistemas solares de preparação de AQS (kWh/ano)

$FF_{\text{PV}}$  – Factor de Forma utilizado e referido no programa de simulação PVsyst (-)

$FF_{\text{RCCTE}}$  – Factor de Forma de acordo com o RCCTE ( $\text{m}^2/\text{m}^3$ )

$F_{\text{pu1}}$  – Factores de conversão de energia final em energia primária ( $\text{kWh}_{\text{primária}}/\text{kWh}_{\text{final}}$ )

$F_{\text{pu2}}$  – Factores de conversão de energia final em emissões equivalentes de  $\text{CO}_2$  ( $\text{g}/\text{kWh}_{\text{final}}$ )

$G$  – Irradiância ( $\text{W}/\text{m}^2$ )

$GD$  – Graus-dias ( $^{\circ}\text{C}.\text{dias}$ )

$G_{\text{ref}}$  – Irradiância de referência ( $\text{W}/\text{m}^2$ )

$H_i$  – Radiação anual incidente no plano do módulo ( $\text{kWh}/\text{m}^2$ )

$I_{\text{mpp}}$  – Corrente correspondente à potência máxima (A)

$I_{\text{sc}}$  – Corrente de curto-circuito (A)

$M_{\text{AQS}}$  – Consumo médio diário de referência de AQS (litros)

$N_a$  – Necessidades de energia para preparação de AQS ( $\text{kWh}/\text{m}^2.\text{ano}$ )

$N_{\text{ac}}$  – Necessidades anuais de energia útil para preparação de AQS ( $\text{kWh}/\text{m}^2.\text{ano}$ )

$N_{\text{ac1}}$  – Necessidades anuais de energia útil para preparação de AQS utilizando para o apoio a electricidade ( $\text{kWh}/\text{m}^2.\text{ano}$ )

$N_{\text{ac2}}$  – Necessidades anuais de energia útil para preparação de AQS utilizando para o apoio o gás natural ( $\text{kWh}/\text{m}^2.\text{ano}$ )

$n_d$  – Número anual de dias de consumo de AQS (dias)

$N_i$  – Necessidades nominais de energia útil para aquecimento ( $\text{kWh}/\text{m}^2.\text{ano}$ )

$N_{\text{ic}}$  – Necessidades anuais de aquecimento do edifício ( $\text{kWh}/\text{m}^2.\text{ano}$ )



$N_{t1}$  – Necessidades totais de energia final sem contabilização da energia produzida pelo colector solar ( $\text{kWh/m}^2 \cdot \text{ano}$ )

$N_{t2}$  – Necessidades totais de energia final com contabilização da energia produzida pelo colector solar ( $\text{kWh/m}^2 \cdot \text{ano}$ )

$N_{tp1}$  – Necessidades globais nominais de energia primária com preparação de AQS com uso de electricidade, sem contabilização da energia produzida pelo colector solar ( $\text{kWh/m}^2 \cdot \text{ano}$ )

$N_{tp2}$  – Necessidades globais nominais de energia primária com preparação de AQS com uso de gás natural, sem contabilização da energia produzida pelo colector solar ( $\text{kWh/m}^2 \cdot \text{ano}$ )

$N_{tp3}$  – Necessidades globais nominais de energia primária com preparação de AQS com uso de electricidade, tendo em conta a energia produzida pelo colector solar ( $\text{kWh/m}^2 \cdot \text{ano}$ )

$N_{tp4}$  – Necessidades globais nominais de energia primária com preparação de AQS com uso de gás natural, tendo em conta a energia produzida pelo colector solar ( $\text{kWh/m}^2 \cdot \text{ano}$ )

$N_{tp5}$  – Necessidades globais nominais de energia em emissões equivalentes de  $\text{CO}_2$  com preparação de AQS com uso de electricidade, tendo em conta a energia produzida pelo colector solar ( $\text{kg/m}^2 \cdot \text{ano}$ )

$N_{tp6}$  – Necessidades globais nominais de energia em emissões equivalentes de  $\text{CO}_2$  com preparação de AQS com uso de gás natural, tendo em conta a energia produzida pelo colector solar ( $\text{kg/m}^2 \cdot \text{ano}$ )

$N_v$  – Necessidades nominais de energia útil para arrefecimento ( $\text{kWh/m}^2 \cdot \text{ano}$ )

$N_{vc}$  – Necessidades nominais de arrefecimento de um edifício ( $\text{kWh/m}^2 \cdot \text{ano}$ )

$P_{mpp}$  – Ponto de potência máxima (Wp)

$P_{nom}$  – Potência nominal instalada (kWp)

$Q_a$  – Energia útil despendida com sistemas convencionais de preparação de AQS ( $\text{kWh/ano}$ )

$V$  – Volume interior ( $\text{m}^3$ )

$V_{mpp}$  – Tensão correspondente à potência máxima (V)

$V_{oc}$  – Tensão de curto-circuito (V)

$Y_f$  – Energia normalizada produzida pelo sistema (h)

$Y_r$  – Energia de referência incidente no plano do colector (h)

## **NOTAÇÕES ESCALARES GREGAS**

$\alpha$  – Absorção (%)

$\gamma_s$  – Posição do sol ( $^\circ$ )

$\Delta T$  – Aumento da temperatura necessário para preparar AQS ( $^\circ\text{C}$ )

$\eta$  – Rendimento das células fotovoltaicas (%)

$\eta_a$  – Eficiência de conversão dos sistemas de preparação de AQS (-)

$\eta_i$  – Eficiência nominal dos equipamentos utilizados para sistemas de aquecimento (-)

$\eta_v$  – Eficiência nominal dos equipamentos utilizados para sistemas de arrefecimento (-)

---

$\tau$  – Coeficiente que relaciona a área dos elementos que separam o espaço útil interior do espaço não útil com a área dos elementos que separam o espaço não útil do ambiente exterior (-)

# CAPÍTULO I

## INTRODUÇÃO

### 1.1- Considerações iniciais

Os seres Humanos têm estado dependentes de fontes energéticas para conseguirem realizar as actividades inerentes à sua existência, seja para conforto, alimentação ou transporte. Do ponto de vista histórico, o consumo de energia teve um grande aumento com a revolução industrial que decorreu na década de 1860. Com este aumento houve um consequente aumento dos impactes ambientais, ou seja, elevados aumentos nos consumos de combustíveis fósseis e elevadas emissões de CO<sub>2</sub>.

Contudo, pouco se sabia acerca dos efeitos negativos que estas práticas induziam no meio ambiente. Nos dias que correm o cenário é bem diferente, sendo conhecidas as consequências que os níveis de consumo elevados de combustíveis fósseis reflectem no meio ambiente, daí a grande preocupação dos governos dos países desenvolvidos em diminuir as emissões de CO<sub>2</sub>, através da diminuição dos consumos de combustíveis fósseis e da utilização de novas fontes de energia, como seja as energias de fontes renováveis.

Com o aumento da procura energética devido ao desenvolvimento de países como a China e Índia, torna-se cada vez mais necessária a utilização de energias de fontes renováveis ao invés das energias convencionais, diminuindo assim a dependência externa que os países da União Europeia (UE) acusam. A UE depende em aproximadamente 54% de energia importada e a preços extremamente elevados devido ao controlo feito por mercados externos. Portugal mais que qualquer outro país devido à situação económica que atravessa deve apostar cada vez mais em fontes de energias renováveis (FER), pois a sua dependência energética é de aproximadamente 81% [41].

Com o objectivo da diminuição destes consumos, emissões e dependências energéticas, variadas medidas estão a ser tomadas por parte de diversos países. A União Europeia (UE) para reforçar estas medidas e promover o aumento da utilização de fontes de energias renováveis (FER), publicou a directiva sobre o desempenho energético dos edifícios (EPBD).

O sector com maior potencial de implementação de energias renováveis e da melhoria da eficiência energética é o sector dos edifícios que consome cerca de 40% dos recursos energéticos da EU [41].

Outro factor importante que contribui para os consumos de energia excessivos nos edifícios deve-se aos baixos níveis de eficiência energética associados. Foi perante este cenário que surgiu a directiva do

---

desempenho energético dos edifícios (Directiva 2002/91 EC de 16 de Dezembro), que foi transposta para a legislação Portuguesa em três diplomas, nomeadamente, o SCE – Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios (DL 78/2006), o RSECE – Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (DL 79/2006) e o RCCTE – Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (DL 80/2006).

Assim sendo, este trabalho surge na sequência da preocupação existente no DEC – FCT/UNL para com os objectivos estratégicos estipulados na EPBD quanto à necessidade da redução dos consumos energéticos nos edifícios procurando a melhoria da eficiência energética em conjunto com a implementação de energias renováveis. Estas estratégias de actuação inserem-se nas metas traçadas pela UE através da nova EPBD para tornar todos os novos edifícios em edifícios de balanço energético nulo ou quase nulo (*nZEB*) a partir de 31 de Dezembro de 2020.

## **1.2- Objectivos e metodologia da dissertação**

A presente dissertação, desenvolvida no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Civil teve como objectivo analisar, do ponto de vista numérico, a contribuição em termos energéticos da integração de sistemas solares activos em edifícios. Esta análise é efectuada com vista a possibilidade de alcançar edifícios de balanço energético nulo ou quase nulo nos termos indicados pela EPBD.

Para o alcance deste fim, pretende-se comparar diferentes soluções de sistemas solares, tentando assim chegar à melhor solução sob o ponto de vista energético.

## **1.3- Organização da dissertação**

A dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos, incluindo o presente capítulo, e três anexos, da seguinte forma:

- no **Capítulo II** sintetiza-se a revisão bibliográfica efectuada, abordando os aspectos gerais mais importantes sobre os *nZEB*, energias renováveis e a sua possível implementação nos edifícios residenciais;
- no **Capítulo III** apresentam-se os programas de simulação numérica existentes e descrevem-se de forma sintetizada e compreensiva os fundamentos teóricos dos programas utilizados na presente dissertação. Este capítulo serviu essencialmente para familiarizar o leitor com os programas abordados ao longo da parte numérica da dissertação;
- no **Capítulo IV** descrevem-se a metodologia/procedimento de simulação numérica, tanto dos sistemas solares fotovoltaicos como do sistema solar térmico. São descritas também todas as decisões/considerações tomadas para a correcta simulação dos sistemas. Apresentam-se os resultados obtidos através do uso dos programas e no fim da apresentação de cada conjunto de resultados é efectuada uma análise e comparação dos resultados obtidos;

- no **Capítulo V** resumem-se as principais conclusões obtidas no trabalho, confrontam-se os objectivos propostos e os resultados alcançados e indicam-se possíveis desenvolvimentos futuros;
- no **Anexo I** apresentam-se os cálculos efectuados de modo a proceder à verificação da compatibilidade dos arranjos fotovoltaicos com o inversor utilizado;
- no **Anexo II** apresentam-se os relatórios obtidos pelo programa de simulação PVsyst;
- no **Anexo III** apresentam-se os quadros com os valores detalhados das comparações Produção/Consumo efectuadas no **Capítulo IV**.

---

## CAPÍTULO II

### ENQUADRAMENTO GLOBAL DO TEMA

#### 2.1- Considerações iniciais

Neste capítulo faz-se uma abordagem à temática dos *net-zero energy buildings* (*nZEB*), e às energias renováveis, como forma de enquadrar o estudo numérico desenvolvido, analisando assim o potencial destas energias para a obtenção de edifícios de balanço energético quase nulo.

Tendo presente sempre o grande consumo mundial de energias não renováveis nas habitações, o impacto ambiental que estes consumos representam e a necessidade de uma elevada redução destes consumos a nível mundial.

#### 2.2- Conceito de “*Net-Zero Energy Buildings*”

*Net-zero energy buildings* são, tal como o nome indica, edifícios de balanço energético nulo ou quase nulo. Esta designação tem vindo a ser muito utilizada nos dias que correm devido à reformulação da Directiva Europeia para o Desempenho Energético de Edifícios (EPBD) de 19 de Maio de 2010.

Segundo o Artigo 2º desta directiva [11] um edifício com necessidades quase nulas de energia trata-se de um edifício com um desempenho energético muito elevado, onde as necessidades de energia quase nulas ou muito pequenas deverão ser cobertas em grande medida por energia proveniente de fontes renováveis produzida no local ou nas suas proximidades [11].

Porém, tendo em conta que esta é uma definição muito geral, surge a necessidade de a definir com maior rigor. Pois a definição deste tipo de edifícios pode levar a variadas interpretações e errada compreensão entre os proprietários, arquitectos e outros intervenientes de projecto.

Por forma a clarificar esta questão Torcellini *et al.* identificou as seguintes definições alternativas à acima apresentada, as quais são utilizadas pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE):

- *Net-Zero Site Energy* – Produz pelo menos tanta energia (de origem renovável) quanto consome ao longo do ano (energia contabilizada no local);
- *Net-Zero Source Energy* – Produz pelo menos tanta energia (de origem renovável) quanto consome ao longo do ano (contabilização efectuada na fonte). “*Source Energy*” refere-se à energia primária útil para a produção de energia útil para o local com a multiplicação dos devidos factores de conversão de energia primária em energia útil;

- *Net-Zero Energy Costs* – Os custos associados à aquisição de energia necessária para a utilização do edifício ao longo de um ano é compensada pela produção e consequente venda de energia produzida;
- *Net-Zero Energy Emissions* – Produção de energia sem emissões (de origem renovável) em quantidade suficiente para compensar a energia adquirida a partir de combustíveis convencionais ao longo de um ano (ou seja, *Zero Carbon Building*) [13, 38].

De notar que não existe uma melhor definição, todas têm vantagens e desvantagens. A equipa de projecto deverá ter em conta os objectivos do proprietário e não só a definição, pois as variadas definições de *nZEB* afectam a forma como os edifícios são projectados para alcançar esse objectivo. No quadro seguinte é apresentado um sumário das vantagens e desvantagens de cada definição:

Quadro 2.1: Resumo das vantagens e desvantagens das definições de *nZEB* (adaptado de [13])

Definição	Vantagens	Desvantagens
<i>Site nZEB</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fácil Implementação;</li> <li>• Verificação através de medições no local;</li> <li>• Abordagem mais conservativa de <i>nZEB</i>;</li> <li>• Factores exteriores não afectam o desempenho;</li> <li>• Fácil de entender e comunicar;</li> <li>• Encoraja o projecto de edifícios eficientes do ponto de vista energético.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Necessita de mais módulos fotovoltaicos para compensar a utilização de gás natural;</li> <li>• Não considera os custos de todos os serviços;</li> <li>• Não tem em consideração os diferentes tipos de combustíveis;</li> <li>• Não conta com as diferenças não energéticas dos diferentes combustíveis (poluição, disponibilidade).</li> </ul>
<i>Source nZEB</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Equaciona os custos dos diversos tipos de energia existentes no local;</li> <li>• <i>nZEB</i> fácil de alcançar;</li> <li>• Maior impacto no sistema de energia.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Não conta com as diferenças não energéticas dos diferentes combustíveis (poluição, disponibilidade);</li> <li>• Conversão em energia primária muito generalizada;</li> <li>• Não considera todos os custos de energia (factor de conversão pode ser muito baixo);</li> <li>• Necessita de definir um factor de conversão fonte-local, o que requer um número significativo de informação</li> </ul>
<i>Cost nZEB</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fácil de implementar e medir;</li> <li>• Mercado exige resultados equilibrados entre tipos de combustíveis diferentes;</li> <li>• Permite um controlo mais eficiente;</li> <li>• Verificado através das contas energéticas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pode não se reflectir na rede eléctrica nacional, pois mais painéis fotovoltaicos podem ser mais importantes na redução dos consumos locais do que a venda de energia à rede;</li> <li>• Tipo de energia muito volátil o que torna difícil controlar ao longo do tempo;</li> <li>• Necessita de acordos para que a energia produzida compense a energia consumida e os custos não energéticos.</li> </ul>
<i>Emissions nZEB</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Melhor modelo de energia verde;</li> <li>• Conta com as diferenças não energéticas dos diferentes combustíveis (poluição, <i>greenhouse gases</i>);</li> <li>• <i>nZEB</i> fácil de alcançar.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Necessita de factores de emissões apropriados.</li> </ul>



### 2.3- Net-Zero Energy Buildings

O projecto de um edifício de balanço energético nulo (*nZEB*) não se limita apenas à implementação de fontes de energias renováveis para compensar as necessidades energéticas do edifício. O seu desempenho depende essencialmente de dois pressupostos fundamentais que são necessários ter em conta, a redução das necessidades energéticas do edifício com a optimização através de medidas passivas e a produção de energia eléctrica ou outros tipos de energia a partir de fontes de energia renováveis, com o objectivo de alcançar o balanço energético desejado (Figura 2.1).

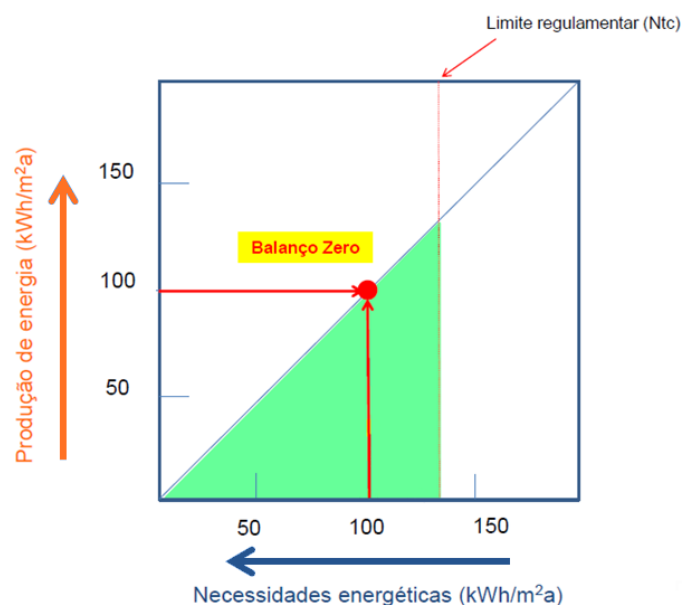


Figura 2.1: Método de obtenção de balanço energético nulo (adaptado de [15])

Da figura anterior poderia concluir-se que os *nZEB* teriam de ser edifícios obrigatoriamente autónomos e isolados, mas tal não é obrigatório visto que estes poderão e terão interesse em continuar ligados a uma rede energética, para apoiar as fontes de energia renováveis caso estas se mostrem insuficientes face às necessidades energéticas, quer se trate de energia eléctrica, sistemas de distribuição de calor e frio, redes de gás, biomassa ou biocombustíveis.

Um edifício de balanço energético nulo (*nZEB*) está geralmente associado a um edifício em que vários sistemas passivos são utilizados com o objectivo de fornecer luz, aquecimento, arrefecimento e ventilação. Um sistema passivo usa e controla os fluxos naturais de energia que envolvem o edifício, tais como a radiação solar e o vento.

Como tem sido referido anteriormente, para alcançar um edifício com elevado desempenho energético é necessário conhecer em detalhe o clima local, a envolvente do edifício e aplicar inúmeras estratégias passivas, tais como [15, 37]:

- melhor aproveitamento de espaços;

- 
- optimização térmica da envolvente (bom isolamento);
  - factor de forma compacto (levando a um menor valor das necessidades de aquecimento);
  - optimização dos ganhos solares (boa orientação e sombreamento dos envidraçados);
  - janelas e caixilhos energeticamente eficientes;
  - iluminação natural (minimizando as necessidades de iluminação);
  - ventilação natural (aplicação de HVAC específicos para o clima local para as necessidades restantes);
  - iluminação eficiente;
  - equipamentos Eficientes.

A realização deste tipo de edifícios tem vindo a ganhar importância nos últimos anos e com a reformulação da EPBD que impõe metas nesse sentido, cada vez mais os novos edifícios serão deste tipo. Esta directiva impõe que todos os Estados Membros assegurem que, a partir de dia 31 de Dezembro de 2020, todos os novos edifícios sejam edifícios com necessidades quase nulas e para edifícios novos ocupados ou detidos por autoridades públicas este prazo é de 31 de Dezembro de 2018 [11].

Cada Estado Membro elaborou os seus planos e metas nacionais para alcançar este objectivo. Portugal assumiu até 2020, as metas de que 31% da energia consumida seja proveniente de fontes de energia renováveis e que 10% da energia do sector dos transportes seja proveniente de fontes de energia renováveis [30].

Para o cumprimento dos compromissos assumidos para com a UE em combater as alterações climáticas, Portugal elaborou Planos e Estratégias com metas ambiciosas para a promoção das fontes de energia renováveis. Em Abril de 2010 foi adoptado uma nova Estratégia Nacional para a Energia 2020 (ENE 2020) que tem seis objectivos concretos e ambiciosos [29]:

1. reduzir a dependência energética do país face ao exterior de 83%, em 2008, para 74% em 2020, - redução essa que equivale a 95 milhões de barris de petróleo;
2. cumprir com os compromissos para 2020 assumidos por Portugal no contexto europeu, ou seja, fazer com que 31% do consumo final de energia seja proveniente de FER e que haja uma redução de 20% no consumo de energia final;
3. reduzir o saldo importador energético com a energia produzida a partir de fontes endógenas em 25% face a 2008 – equivalente a redução de importações de 2000 milhões de euros anuais;
4. criar riqueza e consolidar um cluster energético no sector das energias renováveis em Portugal assegurando um Valor Acrescentado Bruto de 3800 milhões de euros em 2020 e criando mais 100 mil novos postos de trabalho, a acrescentar aos 35000 já existentes;

5. continuar a desenvolver os sectores associados à promoção da eficiência energética com a criação de 21000 novos postos de trabalho e com a geração de um investimento previsível de 13000 milhões de euros até 2020 e exportações adicionais de 400 milhões de euros;
6. promover o desenvolvimento sustentável criando condições para reduzir adicionalmente, no horizonte de 2020, 20 milhões de toneladas de emissões de CO<sub>2</sub>, garantindo de forma clara o cumprimento das metas de redução de emissões assumidas por Portugal.

Assim sendo a Estratégia Nacional para a Energia está assente em cinco eixos principais que se complementam mutuamente [29]:

- Eixo 1. agenda para a competitividade, o crescimento e a independência energética e financeira;
- Eixo 2. aposta nas energias renováveis;
- Eixo 3. promoção da eficiência energética;
- Eixo 4. garantia da segurança de abastecimento;
- Eixo 5. sustentabilidade da estratégia energética.

Anteriormente à criação da Estratégia Nacional para a Energia 2020 já existiam outros planos que fixavam determinados objectivos tais como, o Plano Nacional de Acção para as Energias Renováveis (PNAER 2020), o Plano Nacional de Acção para a Eficiência Energética (PNAEE). A meta a que Portugal se compromete é a melhorar em 20% a sua eficiência energética. A meta definida no PNAEE para 2015 é de 9.8%.

Para alcançar os objectivos o PNAEE no eixo da área residencial e serviços integra três grandes programas de eficiência energética [32]:

- Programa Renove Casa & Escritório – Neste programa são definidas várias medidas relacionadas com a eficiência energética na iluminação, electrodomésticos, electrónica de consumo e reabilitação de espaços;
- Sistema de Eficiência Energética nos Edifícios – Este programa de eficiência agrupa as medidas que resultam do processo de certificação energética nos edifícios, num programa que inclui diversas medidas de eficiência energética nos edifícios, nomeadamente isolamentos, melhoria de vão envidraçados e sistema energéticos;
- Programa Renováveis na Hora – Este programa é orientado para o aumento da penetração de energias endógenas nos sectores residencial e serviços.

Estes programas assentam em seis principais medidas e objectivos, um programa de incentivo à reabilitação urbana sustentável, com o objectivo de ter um em cada quinze lares com classe energética optimizada (superior ou igual a B-), um programa de renovação de um milhão de grandes

electrodomésticos, a substituição de cinco milhões de lâmpadas por lâmpadas fluorescentes compactas (CFL), aplicação de benefícios no licenciamento à construção eficiente (majoração da área de construção), a existência de 75 mil lares electroprodutores (165MW de potência instalada) e a existência de um em cada quinze edifícios com água quente solar [32].

No que concerne aos edifícios, RCCTE estabelece regras a ter em conta no projecto de todos os edifícios de habitação e dos edifícios de serviços sem sistemas de climatização centralizados de modo a que as exigências de conforto térmico, sejam elas de aquecimento ou de arrefecimento, e de ventilação para garantia de qualidade do ar interior dos edifícios, bem como as necessidades de água quente sanitária, possam vir a ser satisfeitas sem dispêndio excessivo de energia. Este regulamento faz com que sejam minimizadas as situações patológicas nos elementos de construção provocadas pela ocorrência de condensações superficiais ou internas, com potencial impacte negativo na durabilidade dos elementos de construção e na qualidade do ar interior [8].

#### 2.4- Energias renováveis

Actualmente, cerca de 80% [41] da energia mundial utilizada é proveniente de carvões minerais, petróleo e gás natural, isto é, proveniente de fontes de energia não renováveis.

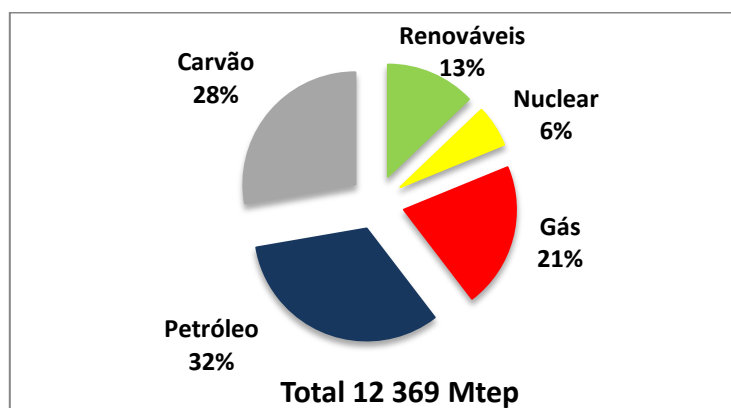


Figura 2.2: Produção de energia mundial (2008) [12]

Torna-se cada vez mais claro que este nível de consumo não pode continuar indefinidamente, pelo que é necessário cada vez mais procurar FER, com o objectivo de reduzir os consumos mundiais de energia proveniente deste tipo de combustíveis e as emissões de gases que contribuem para o efeito de estufa.

A procura de FER é cada vez mais essencial, pois a perspectiva de consumo mundial de energia para os próximos anos é um aumento em um terço de 2010 a 2035 com o rápido desenvolvimento de países como China ou Índia que contribuem em 50% para este aumento [23].

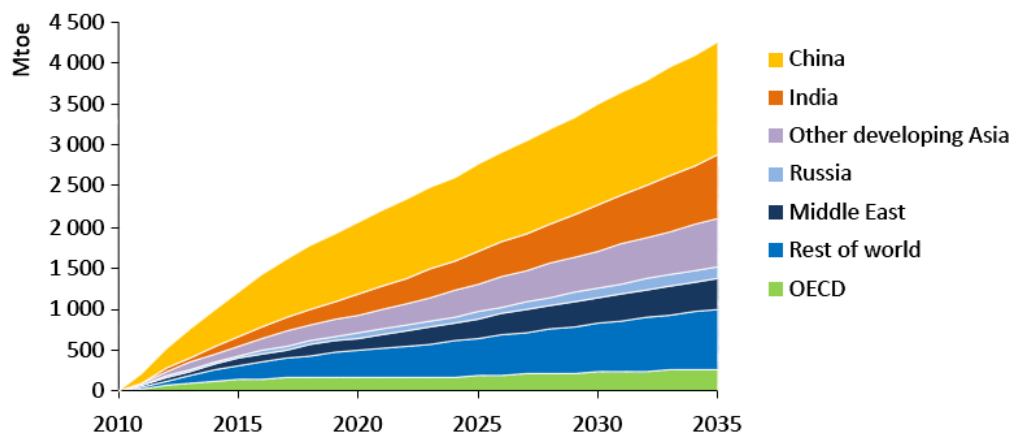


Figura 2.3: Perspectivas futuras de procura energética [23]

A redução do consumo de combustíveis de origem não renovável é necessária para garantir que sejam cumpridos os objectivos a que a UE se comprometeu, a reduzir 20% as emissões de CO<sub>2</sub> até 2020 quando comparado com o ano de 1990, aumentar em 20% a percentagem de energias renováveis no consumo final de energia e aumentar em 20% a eficiência energética.

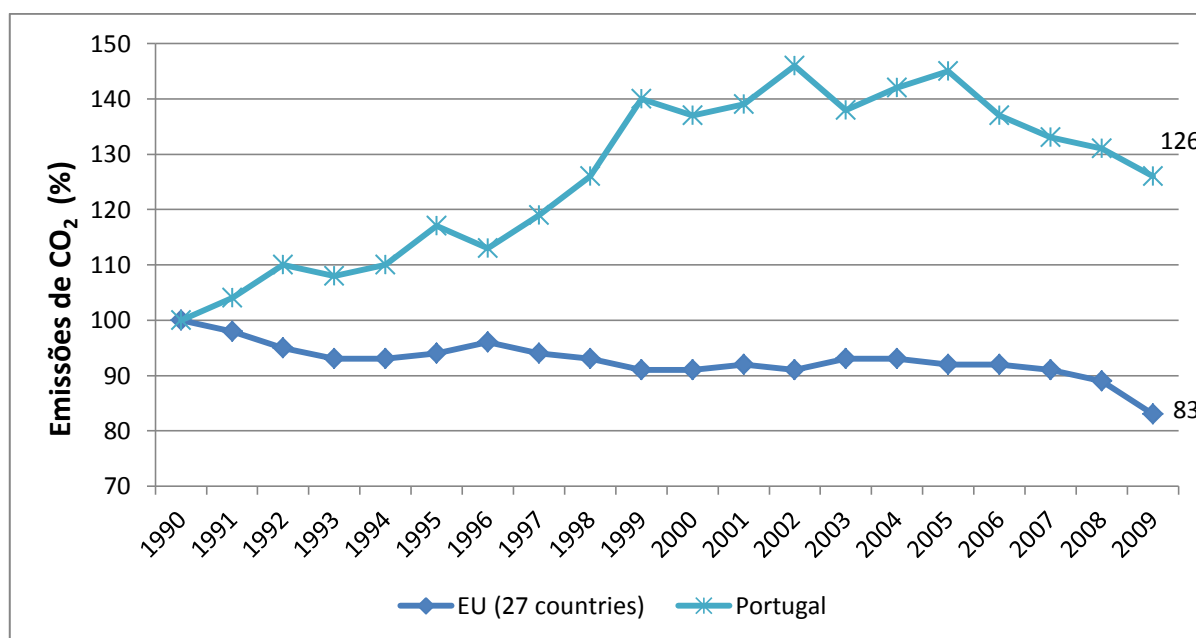


Figura 2.4: Evolução das emissões de CO<sub>2</sub> relativo ao ano de 1990 [41]

Segundo as estatísticas disponibilizadas pela *Eurostat*, a UE encontra-se no bom caminho para alcançar as metas propostas. Contudo é necessário continuar a promover a boa prática no que toca a construção de edifícios eficientes, na redução das emissões de CO<sub>2</sub> e na utilização de FER.

Portugal encontra-se no bom caminho para alcançar as metas a que se propôs para 2020. Portugal possuía em 2009 24,5% da energia final consumida de origem renovável, o objectivo para 2020 é que esta percentagem atinja os 31% [41].

Assim sendo, é necessário continuar a utilizar recursos renováveis em vez dos combustíveis fósseis. Existem diversas fontes de energia renováveis, tal como se mostra no quadro abaixo:

Quadro 2.2: Tipos de energias renováveis existentes

Tipos de Energia Renovável	Possível aplicação à microgeração?
Energia Solar	Sim
Energia das Ondas/Marés	Não
Energia Eólica	Sim
Energia da Biomassa	Não
Energia Geotérmica	Sim
Energia Hídrica ou Hidráulica	Não

Quadro 2.3: Tecnologias das fontes de energia renováveis e respectivos usos (adaptado de [4])

	Electricidade	Aquecimento e arrefecimento	Transporte
Eólico	Em terra (onshore) No mar (offshore)	-	-
Hídrico	Mini-hídrico (<10MW) Grande hídrico (>10MW)	-	-
Solar	Fotovoltaico Solar termoeléctrico de concentração	Solar térmico	-
Oceânico	Ondas Marés	Energia associada ao diferencial térmico dos oceanos (OTEC)	-
Geotérmico	Convencional Sistemas geotérmicos avançados	Uso directo Bombas de calor geotérmicas	-
Bioenergia	Biomassa Biogás	Biomassa Biogás	Bioetanol Biodiesel Biogás

### 2.4.1 - Bioenergia

A bioenergia é um nome genérico para definir a biomassa e os biocombustíveis. Este tipo de energia renovável é proveniente das plantas ou materiais derivados destas, como a madeira. O ser humano usa este tipo de energia desde que começou a queimar madeira para cozinhar e aquecer-se.

A definição de biomassa usada na Europa [10] indica que ela consiste na “*fracção biodegradável de produtos e resíduos provenientes da agricultura (incluindo substâncias vegetais e animais), da silvicultura e das indústrias conexas, bem como a fracção biodegradável de resíduos industriais e urbanos*”.

A madeira continua a ser a maior fonte de bioenergia, mas existem outras fontes que podem ser utilizadas. Estas são plantações agrícolas, gramíneas e plantas lenhosas, resíduos da agricultura, componentes orgânicos de lixos municipais e industriais. Até mesmo os gases provenientes de aterros de resíduos sólidos urbanos (essencialmente metano) podem ser usados como fonte de energia de biomassa ou mais propriamente biogás. Os biocombustíveis líquidos dos quais são exemplos o Bioetanol (produzido a partir da fermentação de hidratos de carbono, com origem em culturas como as de cana-de-açúcar, beterraba, milho, ou por processos sintéticos) e o biodiesel (derivado de lípidos orgânicos renováveis, como óleos vegetais e gorduras animais, é obtido principalmente a partir de óleos de colza ou de girassol) podem ser substitutos directos dos combustíveis fósseis [4, 45].

#### **2.4.2 - Energia Hídrica ou Hidráulica**

A energia hídrica utiliza os cursos de água para alimentar máquinas ou produzir electricidade. A água circula constantemente num ciclo global e inesgotável, sendo evaporada de lagos e oceanos, formando nuvens, precipitando na forma de chuva e neve e finalmente flui novamente até aos oceanos. A energia deste ciclo pode ser aproveitada para produzir electricidade ou para tarefas mecânicas como a moagem de grãos. A energia hídrica tira partido de um combustível, a água, que não é consumido no processo. Existem diversas centrais hidroeléctricas, mas todas usam a energia cinética da água enquanto esta flui para jusante. Turbinas e geradores convertem a energia cinética da água em electricidade, que depois é utilizada em habitações, escritórios e indústrias.

A maior parte das centrais hidroeléctricas tem uma potência instalada elevada, da ordem das centenas de MW ou mesmo milhares. A construção de albufeiras implica um alagamento da zona circundante, com consequências como a perturbação de ecossistemas onde até mesmo o habitat natural dos peixes é afectado. Geralmente esta forma de obtenção de energia eléctrica tem rendimento elevado, atingindo máximos próximos dos 90% [4; 45].

#### **2.4.3 - Energia Oceânica**

Os oceanos ocupam mais de 70% da superfície do globo terrestre, assim sendo estes são o maior colector solar do mundo, produzindo assim energia térmica. Embora o sol afecte todas as actividades do oceano, a força gravitacional da lua produz as marés e o vento as ondas do mar. Há séculos que a energia oceânica é utilizada por moinhos de maré para a moagem de farinha. Hoje em dia este conhecimento foi recuperado para de modo muito semelhante proceder ao aproveitamento hidroeléctrico.

Assim sendo, existem três modos distintos de produção de electricidade através dos oceanos:

- energia das marés;
- energia das ondas;

- energia associada ao diferencial térmico dos oceanos (OTEC).

De entre a enorme variedade de tecnologias são de mencionar o sistema de coluna de água oscilante e o sistema de *Pelamis*. O sistema de coluna de água oscilante consiste numa estrutura oca, parcialmente submersa, aberta na parede frontal e exposta às ondas por baixo da linha de água. A oscilação das ondas faz variar a pressão do ar contido na estrutura, provocando alternadamente, movimentos de ar em ambos os sentidos. A utilização de uma turbina de ar de tipo especial, chamada turbina de *Wells*, permite manter constante o sentido de rotação independentemente do sentido do fluxo de ar que a atravessa [4].

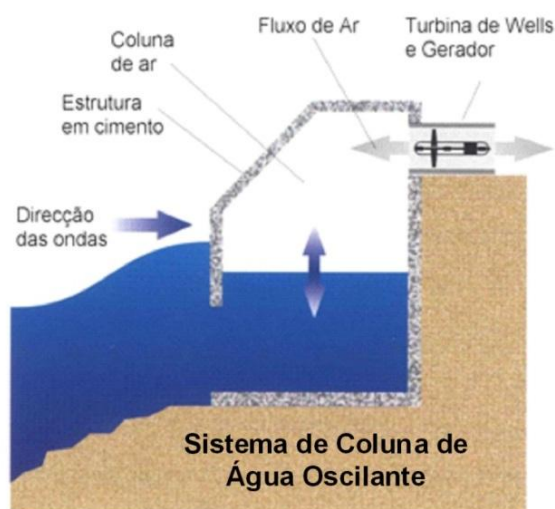


Figura 2.5: Esquema de funcionamento do sistema de coluna de água oscilante [44]

O outro sistema de aproveitamento da energia das ondas designa-se por *Pelamis* e consiste num dispositivo articulado semi-submerso, composto por secções cilíndricas, ligadas por juntas articuladas. A oscilação dos módulos cilíndricos provocada pelo movimento ondulatório das ondas incidentes, leva à pressurização do óleo existente nas juntas que os unem. Este óleo é assim forçado a passar por motores hidráulicos, que por sua vez accionam geradores eléctricos [4].



Figura 2.6: Sistema de *Pelamis* [4]



#### **2.4.4 - Energia Geotérmica**

Diversas tecnologias têm sido desenvolvidas com o objectivo de aproveitar a energia geotérmica, ou seja, o calor do interior da Terra. Este calor pode ser retirado de diversas fontes: águas quentes ou reservatórios de vapor de água no interior terrestre acessível através de perfurações.

Esta variedade de fontes energéticas permite que sejam aproveitadas tanto em grande como em pequena escala. A energia geotérmica pode ser aproveitada das seguintes formas:

- uso directo: produzindo calor directamente de água quente existente na terra;
- produção de electricidade: gerar electricidade através do calor da terra;
- bombas de calor: utilizando a temperatura da superfície terrestre para aquecimento e arrefecimento [4, 45].

A utilização das bombas de calor geotérmicas é uma solução activa de aquecimento e arrefecimento do interior dos edifícios. Estes sistemas são constituídos por tubos, ligados entre si, enterrados no solo na horizontal a uma determinada profundidade, geralmente entre 1,5 e 4 metros, e por ventoinhas com função de circular o ar pelo interior dos tubos. O sistema tira partido da temperatura constante da superfície terrestre entre os 10°C e os 16°C. Uma vez que a transferência de calor se dá do corpo mais quente para o corpo mais frio, o resultado é o ar do interior do edifício no verão ser arrefecido e no inverno ser aquecido [4, 14].

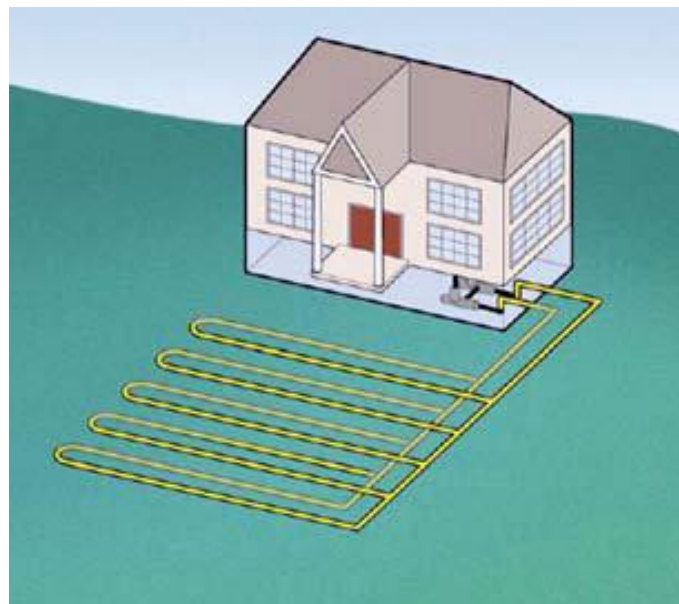


Figura 2.7: Sistema passivo de bomba de calor geotérmica [40]

#### **2.4.5 - Energia Eólica**

Há centenas de anos que a energia eólica tem sido explorada. Desde a Holanda antiga até aos mais modernos parques eólicos, moinhos de vento têm sido utilizados para bombear água ou moer grãos.

Hoje em dia o equivalente ao moinho de vento é a turbina eólica que é utilizada com o objectivo de gerar energia eléctrica.

As turbinas eólicas, como os moinhos de vento, são montadas numa torre para capturar a maior quantidade de energia possível. Para alturas de pelo menos 30 metros acima do solo, estas turbinas conseguem tirar partido de ventos mais rápidos e menos turbulentos. Estes ventos, são causados por diferenças de pressão ao longo da superfície terrestre, devido ao facto da radiação solar recebida na terra ser maior nas zonas equatoriais do que nas zonas polares. Assim sendo, a origem do vento é portanto, a radiação solar. Em Portugal diversas instituições, designadamente o INETI – Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação, dedicaram-se à realização sistemática de medições da velocidade do vento, criando assim um atlas português de vento. Como se pode observar pela figura 2.8 as maiores velocidades médias anuais (6 a 6.5 m/s a 60m de altura) encontram-se na zona costeira oeste, na zona centro e em zonas do interior norte [4, 45].

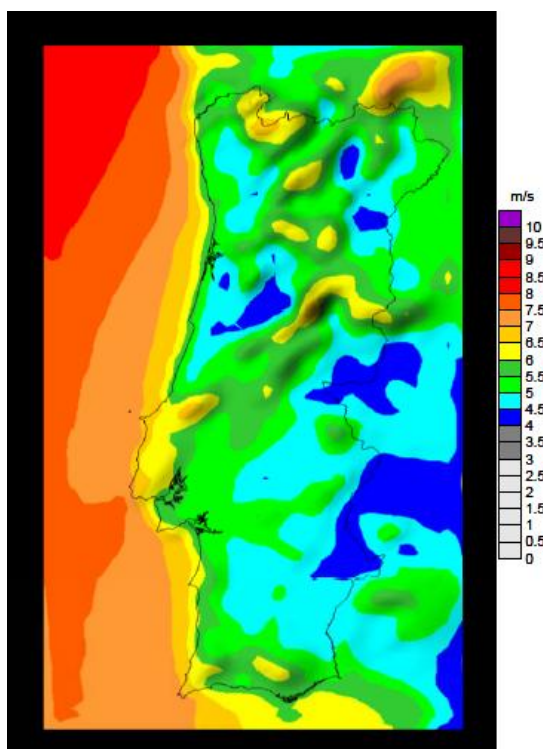


Figura 2.8: Atlas do vento Português [4]

As turbinas capturam a energia do vento por meio das pás do rotor. Normalmente, estas turbinas têm duas ou três pás montadas num rotor. Uma pá do rotor funciona como uma asa de um avião, ou seja, quando esta é atingida por vento é criada uma baixa pressão do lado oposto da pá. Esta baixa pressão faz com que a pá seja arrastada para ela fazendo assim todo o rotor girar sobre um veio. O veio está ligado directamente ou através de engrenagens a um gerador, e a sua rotação permite produzir electricidade.

As turbinas eólicas têm variadas aplicações dependendo do local (*onshore* ou *offshore*), ou seja, se a torre está instalada em terra ou no mar, ou dependendo do tipo de utilização, como sistema de alimentação de um sistema de bombeamento de águas ou rega, de torres de telecomunicações, etc. Podem também ser aplicadas em microgeração em habitações diminuindo assim os consumos eléctricos.

Os aerogeradores utilizados para esta última aplicação são denominados por microgeradores eólicos e apresentam grandes potencialidades de desenvolvimento futuro em termos de aplicações de pequena potência (máximo de alguns kW) em ambiente urbano, ligados à rede, ou em ambiente rural, em sistema isolado [4, 45].



Figura 2.9: Microgerador eólico – TURBAN com potência de 2.5kW [43]

#### **2.4.6 - Energia Solar**

A maior fonte de energia disponível na Terra provém do Sol. A energia solar é das mais “amigas do ambiente”, podendo ser utilizada de diversas maneiras.

A radiação solar tem diversas componentes: a radiação solar directa  $E_{dir}$  proveniente do Sol, que atinge a superfície terrestre sem qualquer mudança de direcção, a radiação difusa que chega aos olhos do observador através da difusão de moléculas de ar, partículas de pó  $E_{dif}$  e a radiação que é reflectida pela superfície terrestre  $E_{ref}$ . A soma destas componentes corresponde à radiação solar global [19].

$$E_G = E_{dir} + E_{dif} + E_{ref} \quad (2.1)$$

Quando o Sol se localiza verticalmente, acima de um determinado local, a radiação percorre o caminho mais curto através da atmosfera. Por outro lado, quando este se encontra num ângulo mais baixo, a radiação percorre um caminho mais longo, sofrendo a radiação assim maior absorção e difusão e estando disponível em menor intensidade quando atinge a superfície terrestre.

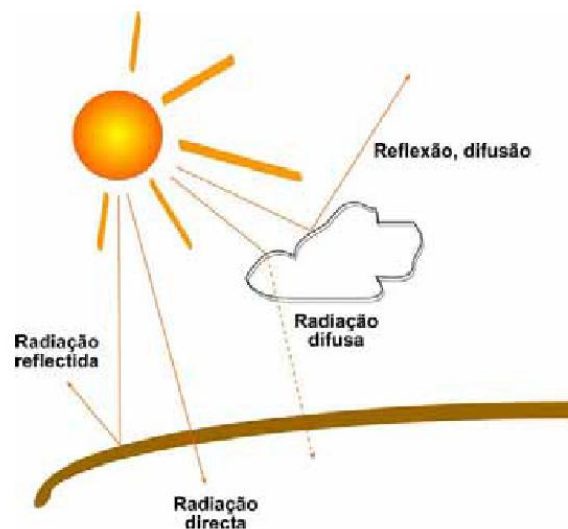


Figura 2.10: Radiação solar global e as suas componentes [19]

Como será fácil de perceber a nebulosidade ou o estado do céu é um factor que afecta bastante a disponibilidade de radiação solar. A energia irradiada tal como a quantidade de radiação difusa e directa varia consoante a quantidade de nuvens existentes [19].

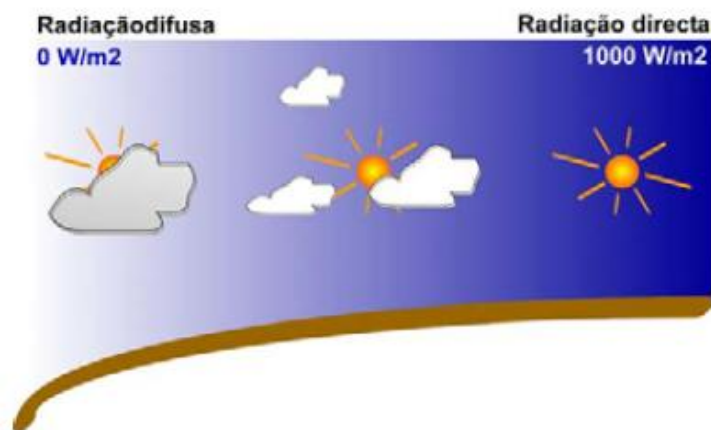


Figura 2.11: Irradiância solar global para diferentes condições do céu [19]

Um dos valores importantes para o dimensionamento de sistemas solares é o valor da média anual de irradiação solar global horizontal que em Portugal Continental varia aproximadamente entre os  $1400 \text{ kWh/m}^2$  (Vila Real) e os  $1700 \text{ kWh/m}^2$  (Faro). Este valor aumenta de norte para sul como se pode observar pela figura 2.12.

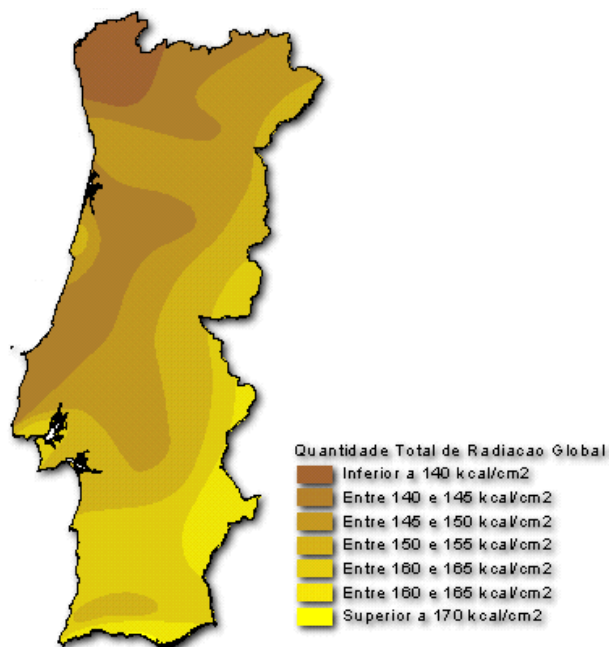


Figura 2.12: Irradiação global anual em Portugal Continental [19]

Outro valor também de elevada importância para o dimensionamento de sistemas solares é o número de horas de insolação. Ao longo do país, esta grandeza varia entre as 1800 e as 3100 horas por ano, como se observa através da figura 2.13.

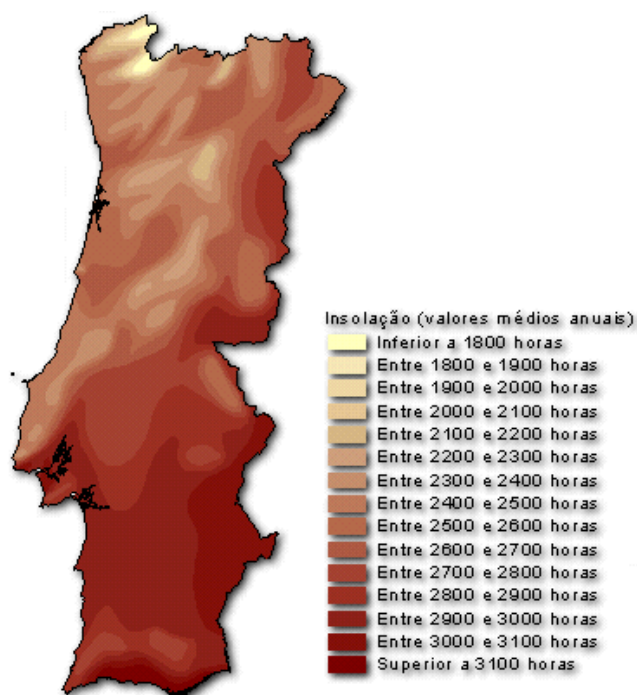


Figura 2.13: Insolação global anual em Portugal Continental [19]

Portugal como um dos países europeus com maior incidência da radiação solar tem um enorme potencial de aproveitamento desta energia renovável. [19]

Outro factor muito importante para o correcto dimensionamento de sistemas solares é o conhecimento da exacta localização do Sol. A localização do Sol pode ser determinada a qualquer momento em qualquer local, pela sua altura e azimuth. Em termos de energia solar, o sul é referido geralmente como Azimute=0°.

As figuras mostradas até aqui são referentes a superfícies horizontais, como por exemplo, uma cobertura em terraço. A inclinação e orientação da superfície, para uma determinada latitude e diferentes ângulos de incidência solar, faz variar estes valores e faz com que exista um máximo de energia produzida. O ângulo de inclinação óptimo, para meses de inverno (menor radiação) é maior que no verão devido à menor altura solar. Na figura seguinte são mostrados os valores médios de irradiação solar global anual medidos para Lisboa para qualquer inclinação e orientação. Os valores de irradiação global anual são dados em kWh/m<sup>2</sup>.

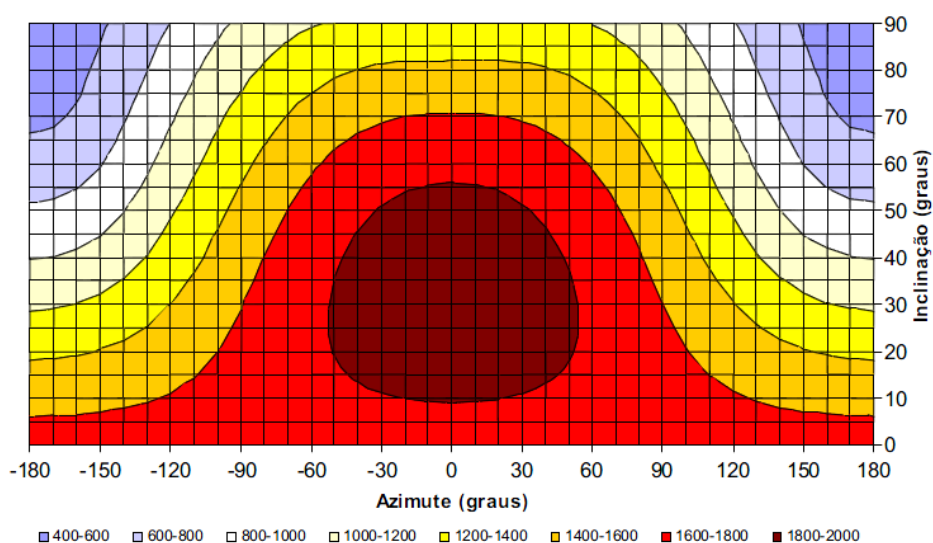


Figura 2.14: Irradiação solar global para diferentes orientações da superfície receptora [19]

Assim sendo, uma correcta orientação das superfícies é importante para maximizar a energia solar captada pelos sistemas. Esta orientação óptima depende em primeiro lugar da posição geográfica, mas também do clima, dos sombreamentos e até do perfil diário de carga (seja ela carga térmica em sistemas solares térmicos ou carga eléctrica em sistemas fotovoltaicos autónomos). Uma pré-optimização pode ser obtida maximizando a energia solar incidente anual. No entanto um dimensionamento final deve ser feito usando simulações energéticas detalhadas do sistema e outros constrangimentos de cada situação em concreto.

O aproveitamento da energia solar pode ser feito através de medidas passivas bastante eficientes, através da produção de energia eléctrica e através da conversão em energia térmica, ou seja, calor.



Na obtenção de energia eléctrica tira-se partido de variadas tecnologias: centrais solares termoelectricas de concentração e sistemas solares fotovoltaicos. O princípio de funcionamento das centrais solares termoelectricas de concentração é genericamente igual ao das centrais térmicas convencionais, onde a diferença existente reside no processo de produção do vapor. Nestes sistemas de concentração a radiação é focada, com auxílio de superfícies espelhadas, sobre um receptor de modo a obter altas temperaturas susceptíveis de produzir vapor. Este vapor é conduzido através de um gerador eléctrico e depois de arrefecido e condensado volta a ser aquecido [4, 45].

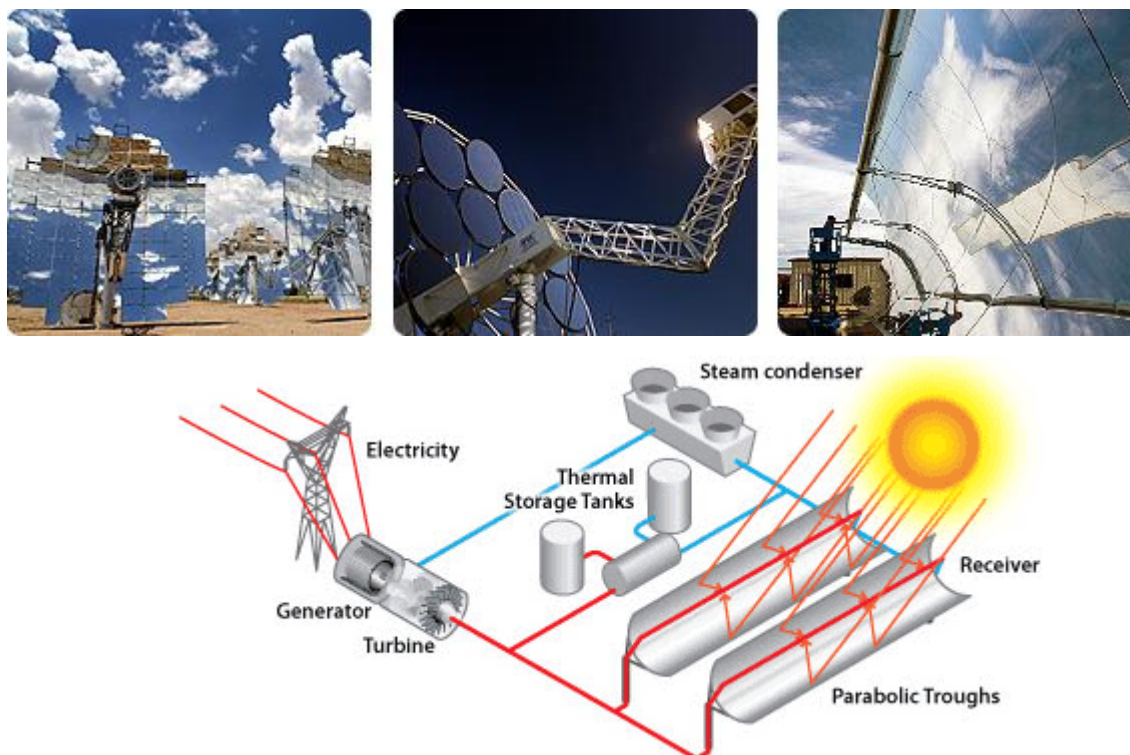


Figura 2.15: Tipos de concentradores solares e esquema simplificado de um sistema solar termoelectrico de concentração [45]

Outro método de conversão de energia solar em energia eléctrica, e mais usual, é com recurso a módulos fotovoltaicos. Estes módulos são constituídos por diversos materiais que depois de devidamente tratados libertam electrões quando expostos à luz solar. Os rendimentos destas tecnologias têm valores compreendidos entre os 6 e os 17% para as soluções mais convencionais. Um módulo fotovoltaico de concentração tem rendimentos de 36 a 40%. Estes sistemas alimentam aplicações de pequena potência (décimas ou unidades de quilowatt), quando aplicados em relógios, calculadoras, telefones de emergência, de média potência (dezenas ou centenas de quilowatt), e de grande potência (megawatt), ou seja, centrais de energia solar fotovoltaica, em sistemas autónomos ou ligados à rede. Os sistemas solares fotovoltaicos com aplicação doméstica podem ser divididos em ligados à rede e em sistemas autónomos. No último caso o aproveitamento da energia solar necessita

de ser ajustado à procura energética. Se o consumo de energia não corresponder à energia produzida é necessário considerar um sistema de baterias e meios de apoio complementares à produção de energia, para que esta não seja desperdiçada. No caso em estudo nesta dissertação, ou seja, um sistema com ligação à rede, a rede pública de distribuição de electricidade funciona como um acumulador de energia eléctrica. Neste caso, a totalidade da energia produzida é injectada na rede eléctrica, com o objectivo de equilibrar ou minimizar os consumos de electricidade.

Na obtenção de energia térmica através da energia solar, existem também diversos métodos de aproveitamento: a produção de água quente através da instalação de colectores solares em habitações e empresas e o aquecimento e arrefecimento do ar de ventilação em empresas e serviços.

Os sistemas solares térmicos funcionam de maneira muito simples, a radiação solar incidente no colector solar penetra através dos vidros e é absorvida por uma placa metálica que se comporta como um corpo negro - a placa absorvora. Na placa absorvora está incorporado um sistema de tubos que serve para transferir o calor gerado para o fluido de transferência térmica, existente no interior destes tubos, que por sua vez flui para o depósito de armazenamento de água. Este calor é transferido para a água do depósito através de um permutador de calor [4, 19, 45]. Este tipo de sistemas, ou seja, as instalações solares térmicas, encontram-se bastante difundidas e com diversas ofertas de rendimentos de conversão.

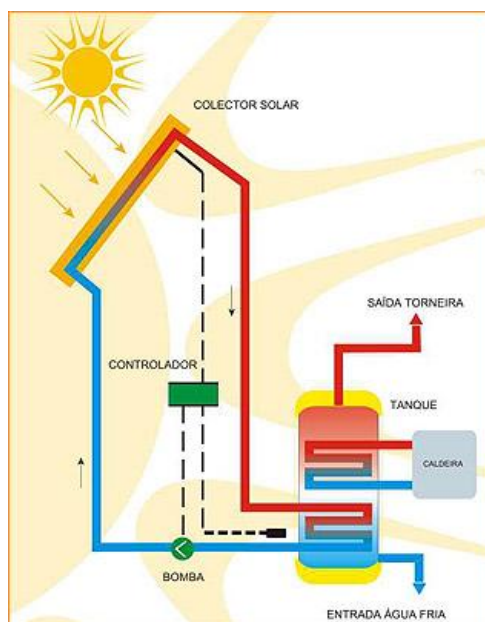


Figura 2.16: Esquema exemplificativo de funcionamento de um sistema solar [42]



## **2.5- Potencial de aproveitamento dos sistemas solares para obtenção de edifícios “net-zero energy”**

Como tem vindo a ser referido, Portugal é um dos países Europeus com maior incidência da radiação solar, ou seja, com um enorme potencial de aproveitamento da energia solar. Visto isto, e seguindo o objectivo traçado para esta dissertação de mestrado, vão ser introduzidas diversas soluções de sistemas solares a um edifício padrão com vista a equilibrar as necessidades energéticas deste. Na tentativa de alcançar este resultado utilizam-se dois tipos distintos de sistemas de aproveitamento da energia solar: o sistema solar fotovoltaico e o sistema solar térmico. De seguida são explicados em pormenor ambos os sistemas, como estes funcionam, as diversas soluções existentes para cada um deles, diferenças entre si e vantagens e desvantagens de aplicação.

### **2.5.1 - Sistema Solar Fotovoltaico**

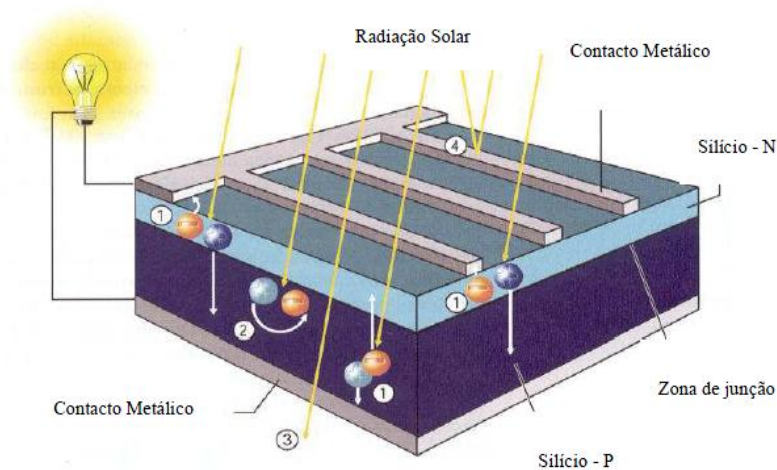
Anteriormente foi feita uma breve e sumária descrição dos módulos fotovoltaicos e do seu funcionamento. Seguidamente vão ser apresentadas as diversas soluções destes sistemas, modo de funcionamento, factores que influenciam o bom funcionamento dos sistemas e as vantagens e desvantagens relativamente a cada solução.

A função de uma célula solar consiste em converter directamente a energia solar em electricidade. A forma mais comum das células solares o fazerem é através do efeito fotovoltaico. O efeito fotovoltaico consiste na transformação directa da potência associada à radiação solar em energia eléctrica DC (*Direct Current*) a partir de processos que se desenvolvem ao nível atómico nos materiais constituintes das células solares, isto é, os materiais constituintes permitem a absorção de fotões com consequente emissão de electrões. Neste processo, são utilizados materiais semicondutores como o silício, o arseneto de gálio, o telureto de cádmio ou disseleneto de cobre e índio.

Actualmente a célula de silício cristalina é a mais utilizada, cerca de 95% de todas as células solares no mundo são de silício. O silício é um elemento que apresenta uma disponibilidade quase ilimitada, uma vez que é produzido a partir da areia de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) [18].

Ao material semicondutor, ou seja o silício, são adicionadas substâncias ditas dopantes, de modo a criar um meio adequado ao estabelecimento do efeito fotovoltaico. A célula fotovoltaica é constituída por pelo menos duas camadas de material semicondutor onde é produzida a corrente eléctrica. Uma destas camadas está contaminada positivamente com boro (tipo P), e a outra, está contaminada negativamente com fósforo (tipo N), sendo esta a camada voltada ao Sol. Quando a luz penetra a célula, alguns dos fotões provenientes desta luz são absorvidos pelos átomos do semicondutor, libertando assim electrões da camada negativa da célula (tipo N) que circulam através do circuito externo, voltando depois à camada positiva (tipo P). Este fluxo de electrões produz uma corrente

elétrica (Figura 2.17). A carga poderá ser vista como um dispositivo que necessite de corrente elétrica, seja uma lâmpada, uma bateria ou até mesmo a rede elétrica [1, 18, 25].



- 1) Separação de cargas; 2) recombinação de cargas; 3) energia do fóton não utilizada; 4) reflexão e sombreamento pelos contactos superiores

Figura 2.17: Esquema geral de funcionamento de uma célula solar [18]

Seguidamente apresenta-se uma lista de algumas vantagens e desvantagens da tecnologia fotovoltaica. De notar que, muitas vezes as vantagens e desvantagens da tecnologia fotovoltaica são praticamente o contrário das convencionais centrais de combustíveis fósseis [26].

#### **Vantagens:**

- a fonte de energia utilizada é vasta e infinita (energia solar);
- sem emissões, combustões ou desperdícios radioactivos (ou seja, não contribui para as alterações climáticas ou para a poluição) durante o tempo de vida útil;
- diminuição do pedido de energia elétrica à rede nacional, adiando assim, a construção de novas barragens ou centrais termoelétricas e nucleares;
- baixo custo de funcionamento (sem combustíveis);
- sem partes móveis (não havendo assim desgaste);
- funciona à temperatura ambiente (sem corrosão devido à elevada temperatura ou sem necessidade de medidas de segurança especiais);
- módulos com elevado tempo de vida útil (> 20 anos);
- aplicação modular;
- rápida instalação;
- pode ser utilizada em edifícios novos ou existentes;
- pode ser instalada em qualquer tipo de edifícios;
- o pico de produção diária pode coincidir com os gastos do local;

- boa aceitação por parte da sociedade;
- excelente funcionamento sob o ponto de vista da segurança.

**Desvantagens:**

- a energia solar é uma energia de baixa densidade;
- custos elevados de instalação;
- fraca fiabilidade dos elementos auxiliares, como elementos de armazenamento (baterias);
- escassez de soluções economicamente eficientes de armazenamento da energia produzida.

**2.5.1.1 - Condições de referência**

As células fotovoltaicas são geralmente expostas a condições de referência de radiação solar e temperatura (*STC – Standard Test Conditions*), esta exposição é feita para a determinação do desempenho destas células. As condições de referência (STC) representam o *standard* mais utilizado na indústria fotovoltaica e mesmo que estas condições raramente se verifiquem sob o ponto de vista prático são usadas para classificar e comparar as células fotovoltaicas. Estas condições são obtidas em laboratório e representam uma aproximação às condições em que as células fotovoltaicas podem ser utilizadas. As condições de referência ou STC encontram-se no quadro 2.4.

Quadro 2.4: Condições de referência - STC [1, 26]

Condições STC	
Irradiância (W/m <sup>2</sup> )	G <sub>ref</sub> =1000
Temperatura da célula (°C)	T=25
Massa de Ar (AM)	1,5

A massa de ar representa um múltiplo do percurso da radiação solar na atmosfera para um local preciso, num determinado momento. Relaciona a posição do Sol ( $\gamma_s$ ) com a Massa de Ar através da expressão

$$AM = \frac{1}{\sin \gamma_s} \quad (2.2)$$

O valor de AM médio europeu considerado é de AM = 1,5. A radiação solar no espaço, onde esta não é influenciada pela atmosfera, é designado por espectro AM 0. Um AM = 1 acontece quando a posição

do Sol é perpendicular ( $\gamma_s=90^\circ$ ). Este espectro corresponde à posição do Sol no equador ao meio dia, no início da Primavera ou do Outono [18].

### 2.5.1.2 - Tipos de células de módulos fotovoltaicos

Os módulos cristalinos são actualmente os mais utilizados em habitações e serviços e constituem a primeira geração de sistemas fotovoltaicos. Uma das principais razões é o seu melhor rendimento relativamente às outras soluções como se poderá observar nos pontos seguintes.

Os módulos fotovoltaicos podem se dividir em três tipos consoante o tipo de células:

- módulos de silício monocristalino;
- módulos de silício policristalino;
- módulos de filme fino (silício amorfo, CdTe, Arseneto de gálio, módulos CIS, etc).

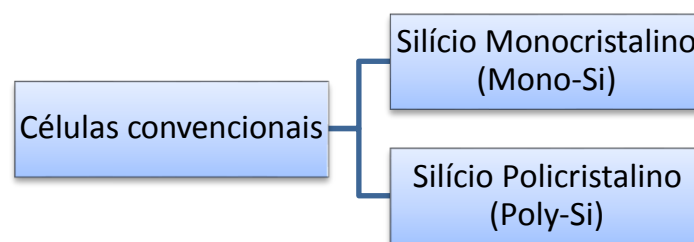


Figura 2.18: Esquema exemplificativo dos tipos de células convencionais

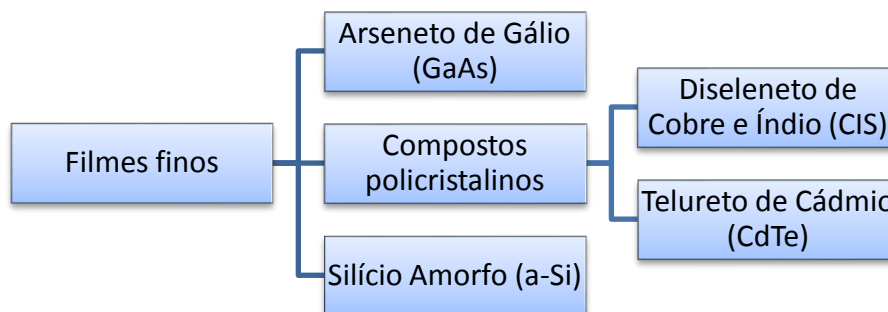


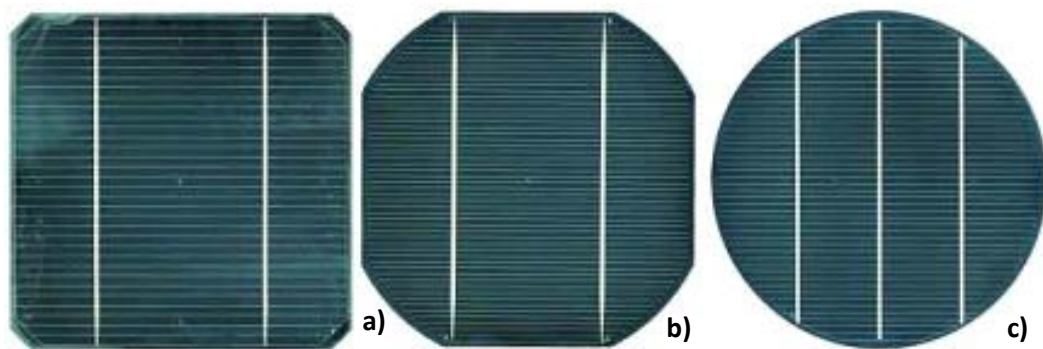
Figura 2.19: Esquema exemplificativo dos tipos de compostos dos módulos fotovoltaicos de filme fino

#### • Células de Silício Monocristalino (Mono-Si):

Estas células representam a primeira geração de células fotovoltaicas. São as mais comuns no mercado (cerca de 60% [4]), no entanto o seu fabrico é muito complexo e ainda muito dispendioso (através do método de Czochralski), pois apresentam necessidades energéticas muito elevadas no seu fabrico, devido à exigência de utilização de materiais em estado muito puro e por terem que ter uma estrutura de cristal perfeita. Os rendimentos máximos atingidos em laboratório em condições de referência

(irradiância de  $1000 \text{ W/m}^2$  e a uma temperatura de  $25^\circ\text{C}$ ) para as células são de  $25.0\% \pm 0.5\%$  [17, 24] e para os módulos são de  $22.9\% \pm 0.6\%$  [17]. Para módulos comerciais em funcionamento num determinado sistema é comum que este rendimento se reduza para cerca de 15% [4].

As células podem ser redondas ou semi-quadradas. As células redondas são mais baratas do que as semi-quadradas, uma vez que se perde menos material durante a sua produção. Isto deve-se ao facto das células saírem da linha de produção em cristais únicos cilíndricos de trinta centímetros de diâmetro e vários metros de comprimento. No entanto, poucas vezes são utilizadas células redondas em módulos standard devido à exploração ineficaz do espaço. As células maioritariamente apresentam dimensões de  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  ou  $12.5 \times 12.5 \text{ cm}^2$ , diâmetros de 10, 12.5 ou 15 cm, apresentam uma espessura de 0,3 mm e a cor é na gama de azul-escuro para preto (com anti-reflexão) e cinza (sem anti-reflexão) [18, 27].



a) célula semi-quadrada I; b) célula semi-quadrada II; c) célula redonda

Figura 2.20: Células de silício monocristalino [18]

- **Células de Silício Policristalino (Poly-Si):**

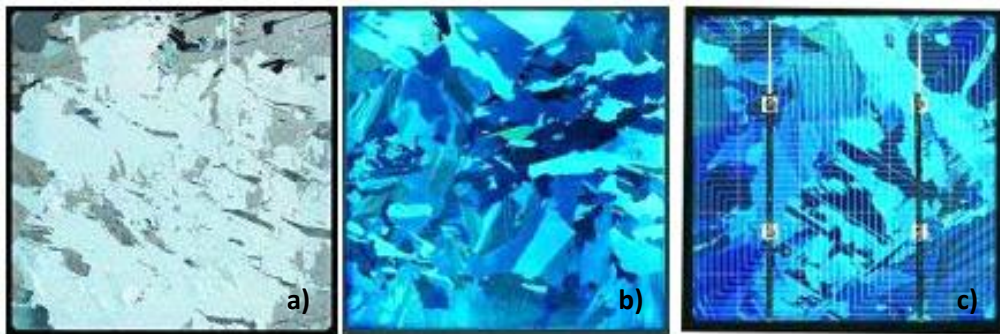
O processo de produção mais comum para o silício policristalino é o de fundição de lingotes. O silício em estado bruto (polisilício) é aquecido e posteriormente arrefecido de modo a serem criados blocos de silício de  $40 \times 40 \text{ cm}^2$  e uma altura de 30 cm. Os blocos inicialmente são serrados em barras e depois em bolachas com espessura de 0,3 mm. Por último são fixados os contactos eléctricos no lado frontal e uma camada de anti-reflexão (AR). Este processo é menos dispendioso e complexo quando comparado com a produção de células de silício monocristalino, pois as células policristalinas não necessitam de tão elevada perfeição dos cristais.

As células policristalinas apresentam rendimentos inferiores quando comparadas com células monocristalinas. Estas células têm rendimentos de  $20.4 \pm 0.5\%$  [17, 24] enquanto os módulos têm rendimentos de  $18.2 \pm 0.4\%$  [17], rendimentos estes obtidos em laboratório em condições ideais. Os rendimentos em utilização prática rondam os 13 e 15% [18]. Considerando este valor de aproveitamento útil da energia solar incidente, o restante é perdido sob a forma de:

- reflexão e sombreamento pelos contactos superiores, 3%;
- quantidade insuficiente de fotões de radiação de grande comprimento de onda, 23%;

- quantidade excessiva de fótons de radiação de curto comprimento de onda, 32%;
- perdas por recombinação, 8,5%;
- gradiente eléctrico na zona de depleção, 20%;
- resistência (perdas por efeito de Joule), 0,5%.

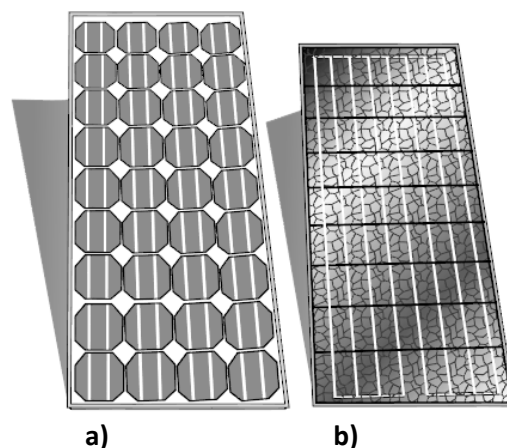
Este tipo de células dispõe de uma quota de mercado de cerca de 30%. Estas células apresentam-se geralmente com dimensões de  $10 \times 10 \text{ cm}^2$ ,  $12,5 \times 12,5 \text{ cm}^2$  ou  $15 \times 15 \text{ cm}^2$ , com 0,3 mm de espessura e com a cor azul caso lhe seja aplicado uma camada anti-reflexão ou cinzenta prateada caso contrário [18, 27].



a) Bolacha policristalina sem camada de anti-reflexão; b) Bolacha policristalina com uma camada de anti-reflexão; c) Célula policristalina com AR e filamentos eléctricos

Figura 2.21: Células de silício policristalino [18]

Geralmente os módulos de silício monocristalino são mais eficientes que os módulos de silício policristalino a nível das células, pois a estrutura molecular dos lingotes é uniforme do topo à base, no caso monocristalino. Esta característica permite aos fótons mover um maior número de electrões quando sob o efeito da radiação solar, pois as células estão todas alinhadas e com a mesma direcção. Nas células policristalinas os cristais têm diversas formas e estão orientadas em direcções diferentes reduzindo assim o seu rendimento (Figura 2.22).

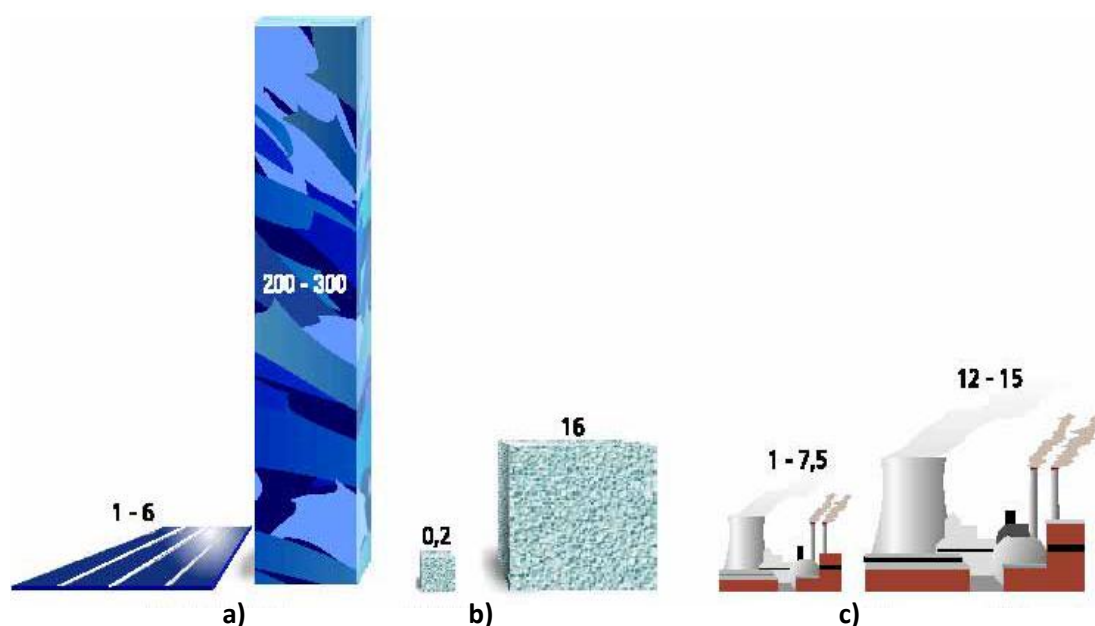


a) Módulo monocristalino; b) Módulo policristalino

Figura 2.22: Tipos de Módulos Cristalinos

Com a expansão do mercado fotovoltaico surgiu a segunda geração de módulos fotovoltaicos com a tecnologia de Filme Fino (*Thin Film*). Os semicondutores fotoactivos são aplicados em finas camadas num substrato (geralmente vidro). O silício amorfo, o disseleneto de cobre e índio (CIS) e o telureto de cádmio (CdTe) são utilizados como materiais semicondutores. Devido à sua elevada absorção luminosa, uma camada com espessura menor que 0.001mm é teoricamente suficiente para a conversão de energia solar em energia eléctrica.

Os menores consumos de materiais e de energia, assim como a elevada automatização da produção em larga escala, leva a uma redução de custos de produção quando comparado com a tecnologia de produção do silício cristalino. As células de película fina não estão restringidas no seu formato aos tamanhos *standard* das bolachas como acontece no caso das células cristalinas. O substrato pode ser cortado em vários tamanhos e revestido com material semicondutor [18].



Comparação entre: a) a espessura da célula em  $\mu\text{m}$ , b) o material utilizado em  $\text{kg/kWp}$  e c) o gasto energético em  $\text{MWh/kWp}$  entre células de película fina (à esquerda) e células de silício cristalino (à direita)

Figura 2.23: Diferenças de consumos na produção de células cristalinas e de filme fino [18]

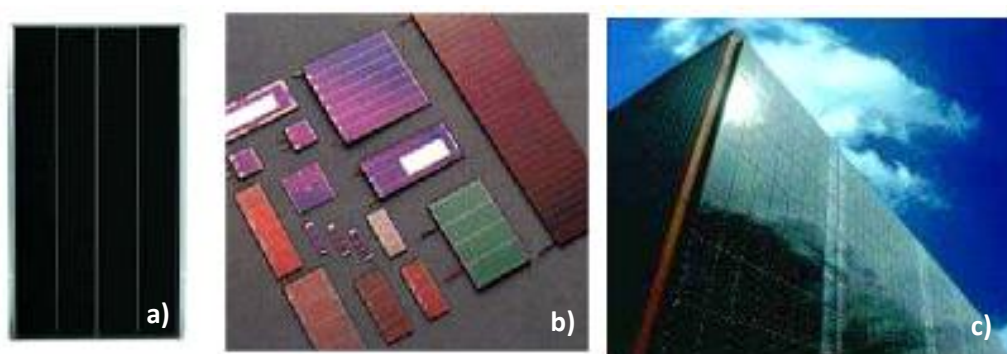
- **Células de Silício Amorfo (a-Si):**

O silício amorfo não possui uma estrutura cristalina mas sim uma estrutura irregular. Como resultado apresenta defeitos estruturais que, em princípio, impediriam a sua utilização em células fotovoltaicas. No entanto, no caso do silício amorfo hidrogenado as ligações livres absorvem hidrogénio até à saturação. Neste processo, chamado de hidrogenização, os átomos de hidrogénio combinam-se quimicamente de forma a minimizar os efeitos negativos dos defeitos estruturais formando assim silício amorfo hidrogenado (a-Si:H). O seu processo de fabrico é ainda menos dispendioso que o das células policristalinas, pois é necessário menor quantidade de energia e material.



Esta tecnologia permite depositar a célula sobre um substrato como plástico, vidro ou metal. A maior utilização de células de silício amorfo é em produtos da indústria electrónica, como relógios ou calculadoras, mas também já estão a ser estendidos a sistemas integrados em edifícios (*BIPV – Building Integrated Photovoltaics*). A maior desvantagem desta tecnologia é o seu rendimento, que para células testadas em laboratório em condições ideais não passa dos  $10.1 \pm 0.3\%$  [17, 24], mas as propriedades conversoras do material deterioram-se em utilização prática, pelo que os rendimentos descem para cerca de 5 a 8% [18].

As células de silício amorfo podem apresentar a forma desejada com tamanhos máximos de módulos de  $0.77 \times 2.44 \text{ m}^2$  ou em módulos especiais um máximo de  $2 \times 3 \text{ m}^2$ , com uma espessura de 1-3mm para o substrato (plástico, metal ou vidro), com um revestimento de silício amorfo de aproximadamente 0.001mm. A gama de cores que apresentam são do castanho avermelhado ao preto.



a) Módulo de silício amorfo; b) diferentes tipos de células de silício amorfo; c) Fachada solar no centro de investigação Joint Research Centre em Ispira, Itália (*BIPV*)

Figura 2.24: Células de silício amorfo [18, 25]

- **Células de Diseleneto de Cobre e Índio (CIS):**

As células de diseleneto de cobre e índio (CIS), são outro tipo de película fina que muitas vezes forma uma liga com o gálio e/ou o enxofre (CIGS). Os substratos, como no caso do silício amorfo, podem ser rígidos (vidro) ou flexíveis. A tecnologia CIGS tem vindo cada vez mais a ser utilizada, pois utiliza muito menos material no seu fabrico quando comparada com outras películas finas (nanómetros em vez de micrómetros de material). Esta diferença permite que o CIGS use menos material, tornando assim o seu fabrico menos dispendioso. Será expectável que ao avançar-se com uma produção em massa os custos venham a ser consideravelmente mais baixos que o silício cristalino. Outra vantagem desta solução é o facto de ao contrário do silício amorfo, as células de CIGS não se degradam com a exposição à radiação solar. Contudo, apresentam problemas de estabilidade em ambientes quentes e húmidos, pelo que tem que ser garantida uma boa selagem contra a humidade.

Os módulos de CIS podem ser fabricados no formato desejado com um tamanho máximo de módulos de  $1.20 \times 0.6 \text{ m}^2$ , uma espessura de 3mm para o substrato (vidro não solidificado) com um revestimento



de 0.003mm e de cor preta. As células de CIS são as células de película fina de maior eficiência de conversão de energia solar em energia eléctrica atingindo valores em laboratório de  $20.3\pm0.6\%$  [17, 24] e para módulos testados em laboratório a eficiência é de  $15.7\pm0.5\%$  [17].

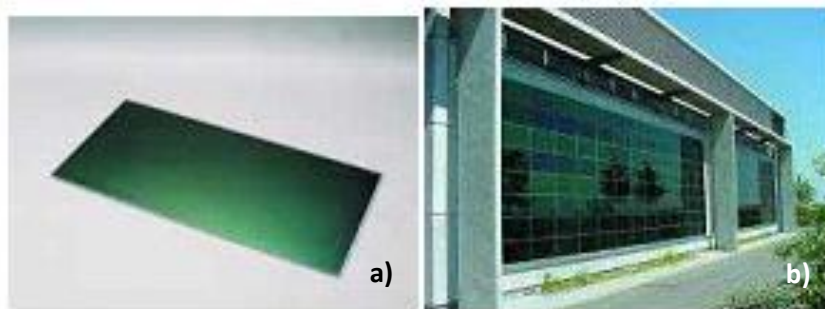


Figura 2.25: Módulos CIS [18]

- **Células de Telureto de Cádmio (CdTe):**

As células de telureto de cádmio são outra tecnologia existente de módulos de película fina. Na construção destes módulos fotovoltaicos uma camada muito fina (apenas alguns micrómetros) de telureto de cádmio é colocada sobre um substrato de vidro. Para proteger as células é colocada outra camada de vidro, formando assim um módulo fotovoltaico semitransparente que pode ser utilizado como janela convencional, permitindo a entrada de luz no edifício enquanto é produzida electricidade, contudo esta característica apresenta a desvantagem de quanto mais transparente for o módulo mais radiação este deixa passar o que leva à diminuição do seu rendimento de conversão de energia solar em energia eléctrica. Tal como a produção de módulos CIS, esta tecnologia também tem um potencial considerável na redução de custos de produção em massa, pois o custo dos materiais é inferior e estes são utilizados em pequena quantidade. No entanto, o cádmio é um elemento tóxico o que pode dificultar a sua aceitação no mercado e o telureto é um elemento raro cuja disponibilidade pode vir a ser problemática, caso a tecnologia evolua.

Os valores de rendimento de conversão para células de telureto de cádmio obtidas em laboratório em condições ideais são de  $16.7\pm0.5\%$  [17, 24] e para módulos ronda os  $12.8\pm0.4\%$  [17]. Como nos restantes módulos de película fina, estes também podem ser fabricados com a forma desejada com um tamanho máximo de  $1.20\times0.6\text{m}^2$ , com uma espessura de 3mm de substrato (vidro não solidificado) com 0.008mm de revestimento e uma cor de reflectividade de verde-escuro a preto [18, 27].



a) Módulo de Telureto de Cádmio; b) Edifício industrial com módulos ATF em Florsheim, Alemanha

Figura 2.26: Módulos de Telureto de Cádmio [18]

- **Células de Arseneto de Gálio (GaAs):**

Este tipo de células são chamadas semicondutores III-V, que consistem em elementos do Grupo III e do Grupo V da tabela periódica, estas células permitem a produção de células solares de elevada eficiência. Têm um custo de produção muito elevado quando comparadas com as restantes soluções, logo não se tornam competitivas sob este ponto de vista. Por este motivo, são apenas utilizadas no espaço e para sistemas de concentração, normalmente combinadas com compostos adicionais III-V, tais como o GaSb ou o GaInO, em células solares sobrepostas. Estas células são chamadas de células de junção dupla e tripla e são objectos interessantes de investigação, num esforço que visa estabelecer novos recordes de eficiência solar.

Estas células têm rendimentos obtidos em laboratório em células de junção dupla de  $28.3 \pm 0.8\%$  [17], em células junção tripla (GaInP/GaAs/Ge) de  $34.1 \pm 1.2\%$  [17].

De seguida apresenta-se um quadro resumo dos rendimentos de conversão de energia solar em energia eléctrica das diferentes soluções:

Quadro 2.5: Quadro resumo dos rendimentos das diversas células fotovoltaicas [17, 24]

<b>Tecnologia</b>	<b>Células em laboratório (%)</b>	<b>Módulos em laboratório (%)</b>
Silício Monocristalino (Mono-Si)	$25.0 \pm 0.5$	$22.9 \pm 0.6$
Silício Policristalino (Poly-Si)	$20.4 \pm 0.5$	$18.2 \pm 0.4$
Silício Amorfo (a-Si)	$10.1 \pm 0.3$	<sup>1)</sup>
Diselenieto de Cobre e Índio (CIS)	$20.3 \pm 0.6$	$15.7 \pm 0.5$
Telureto de Cádmio (CdTe)	$16.7 \pm 0.5$	$12.8 \pm 0.4$
Arseneto de Gálio (GaAs)	$28.3 \pm 0.8$	$23.5 \pm 0.7$

<sup>1)</sup> Os rendimentos para módulos de silício amorfo testados em condições STC em laboratório não estavam disponíveis nas fontes consultadas [18, 25]

### 2.5.1.3 - Características I-V e P-V

Os módulos fotovoltaicos são classificados segundo a potência máxima de saída ou potência de pico MPP (*Maximum Power Point*) em condições STC. Segundo estas condições obtêm-se curvas características dos módulos (I-V e P-V). Observando a figura 2.27 das características da corrente e da potência em função da tensão, identificam-se as características dos módulos fotovoltaicos como [4, 35]:

- potência máxima de saída (MPP): Ponto onde o produto da corrente pela tensão resulta na potência máxima;
- tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ): representa a máxima tensão que o dispositivo atinge para uma determinada temperatura e corrente igual a zero;
- corrente de curto-circuito ( $I_{sc}$ ): ponto na curva que representa o valor da corrente máxima quando o sistema está em curto-circuito, ou seja, quando a tensão é nula;
- tensão correspondente à potência máxima ( $V_{mpp}$ );
- corrente correspondente à potência máxima ( $I_{mpp}$ );
- ponto de potência máxima ( $P_{mpp}$ ).

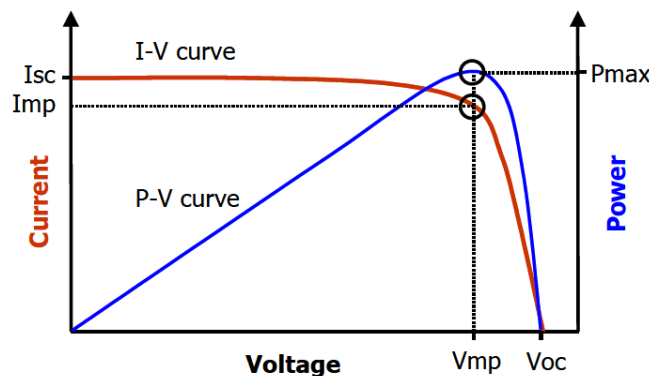


Figura 2.27: Curvas características I-V e P-V de um sistema fotovoltaico (a curva P-V é obtida através dos valores da curva de I-V) [35]

Outro parâmetro de grande importância na definição dos módulos fotovoltaicos é o factor de forma (fill factor –  $FF_{PV}$ ) de uma célula fotovoltaica. O factor de forma é definido como a relação (em percentagem) entre a potência máxima real obtida ( $V_{mpp}$ ,  $I_{mpp}$ ) e a potência teórica ( $V_{oc}$ ,  $I_{sc}$ ) e representa um critério de qualidade das células solares. Este valor é sempre menor que um.

$$FF_{PV} = \frac{V_{mpp} \times I_{mpp}}{V_{oc} \times I_{sc}} \quad (2.3)$$

De notar que tanto  $V_{oc}$ ,  $I_{sc}$  como o  $P_{mpp}$ ,  $V_{mpp}$ ,  $I_{mpp}$  são valores característicos da célula e são fornecidos pelo fabricante e geralmente obtidos em condições de referência STC.

O rendimento das células fotovoltaicas é calculado normalmente em condições STC, e é obtido através do quociente entre a potência eléctrica máxima de saída e a potência disponível na radiação solar incidente.

$$\eta = \frac{P_{mpp}}{P_{solar}} = \frac{V_{mpp} \times I_{mpp}}{A \times G} \quad (2.4)$$

Onde “A” representa a área da célula ( $m^2$ ) e “G” a radiação solar incidente por unidade de superfície, ou seja, a irradiância ( $W/m^2$ ) [1, 18].

#### 2.5.1.4 - Influência da temperatura e da irradiância

Contrariamente a outras tecnologias os módulos fotovoltaicos raramente se encontram em funcionamento em condições nominais de referência. Este funcionamento apenas ocorre nas condições de referência STC. O desempenho e as curvas características dos módulos fotovoltaicos dependem da temperatura e da intensidade de corrente que atravessa o módulo.

A influência da temperatura da célula nas características da célula é representada na figura 2.28. Através da figura pode observar-se que o maior efeito do aumento da temperatura da célula é na tensão de circuito aberto que diminui proporcionalmente com a temperatura, por outro lado a corrente de curto-circuito varia muito pouco com a temperatura pelo que habitualmente é desprezada nos cálculos. A potência de saída decresce também com o aumento da temperatura, assim como o rendimento da célula.

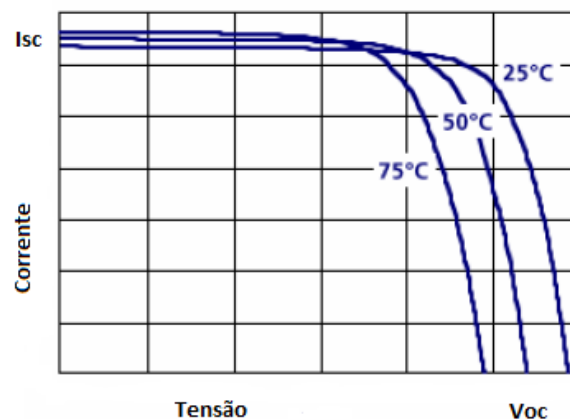


Figura 2.28: Influência da temperatura em células fotovoltaicas na curva característica I-V (adaptado de [4])

Na figura 2.29 ilustra-se a variação da curva I-V devido à variação da irradiância na célula fotovoltaica. Observa-se que a corrente de curto-circuito varia linearmente com a irradiância, no entanto a tensão de circuito aberto varia pouco com a irradiância. A potência de saída aumenta com o aumento da irradiância incidente [1, 4, 18].

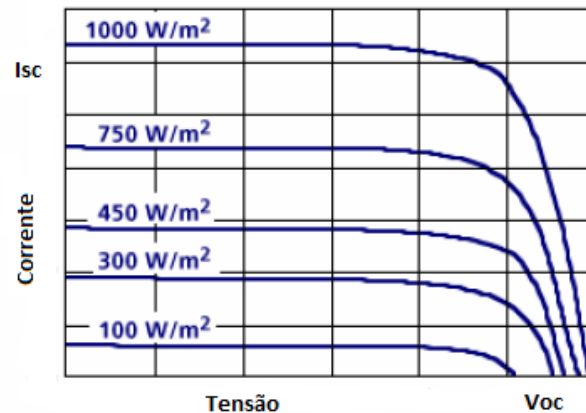


Figura 2.29: Influência da Irradiância em células fotovoltaicas na curva característica I-V (adaptado de [4])

#### **2.5.1.5 - Sistemas ligados à rede**

Como foi referido anteriormente, existem dois tipos de sistemas fotovoltaicos, sistemas com ligação à rede e sistemas autónomos. Seguidamente vai ser descrita a solução de sistemas com ligação à rede visto tratar-se da solução adoptada na parte numérica desta dissertação. Os sistemas com ligação à rede têm um dimensionamento mais simples e flexível, pois não necessitam de baterias, a rede pública eléctrica está sempre presente para receber toda a energia produzida. Para além desta diferença existem algumas vantagens relativamente aos sistemas autónomos:

- é constituído por menos componentes;
- o projecto e a instalação são mais simples (ou seja, menos dispendioso);
- a energia produzida é maior;
- menores requisitos de manutenção;
- o inversor pode ser localizado no exterior do edifício.

Um sistema fotovoltaico com ligação à rede é composto, geralmente, pelos seguintes componentes (componentes indicados na figura 2.30 com a numeração adoptada):

- 1 - gerador fotovoltaico (vários módulos fotovoltaicos dispostos em série e em paralelo, com estruturas de suporte);
- 2 - caixa de junção (equipada com dispositivos de protecção e interruptor de corte principal DC);

- 
- 3 - cabos AC e DC com diferentes secções;
  - 4 - inversor;
  - 5 - mecanismos de protecção e aparelho de medida [4, 18].

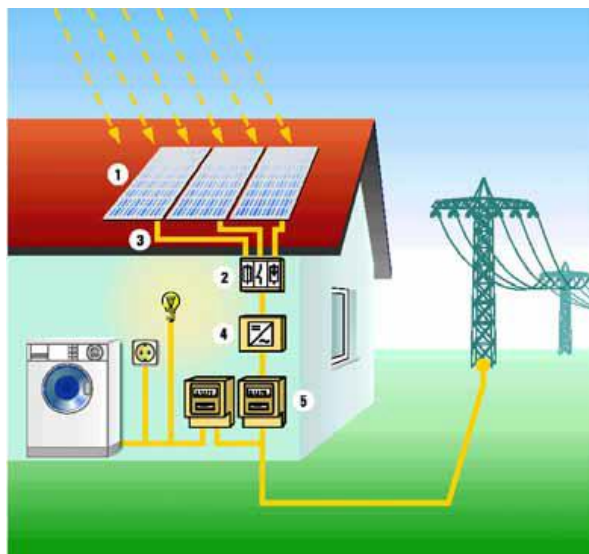


Figura 2.30: Componentes de um sistema fotovoltaico com ligação à rede [18]

Anteriormente já foram descritas as características de diversos tipos de módulos fotovoltaicos bem como o seu funcionamento. Seguidamente descrevem-se os restantes componentes de um sistema fotovoltaico com ligação à rede.

- **Caixa de junção:**

As fileiras de módulos fotovoltaicos são ligadas entre si na caixa de junção geral do gerador. Para além destes cabos são ligados também o cabo principal DC que faz a ligação da caixa de junção ao inversor. A caixa de junção geral do gerador contém terminais, aparelhos de corte e, se necessário, fusíveis de fileira e díodos de bloqueio de fileiras para que caso numa fileira ocorra um curto-circuito as restantes se mantenham em normal funcionamento.



Figura 2.31: Caixa de junção geral do gerador [18]

- **Inversor:**

Os inversores convertem a corrente DC produzida pelos módulos fotovoltaicos em corrente AC utilizada nas habitações ou serviços, e ajustam esta energia para a frequência e o nível de tensão da rede a que o sistema se liga. O símbolo eléctrico mais utilizado para definir um inversor em esquemas representativos é o apresentado na figura 2.32. Este símbolo representativo não está de acordo com a norma IEC - *International Electrotechnical Commission* [18].

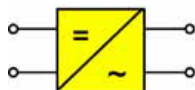


Figura 2.32: Símbolo eléctrico para o inversor [18]

Existem dois tipos de inversores que dependem do tipo de utilização a que se destinam. Estes podem ser utilizados em sistemas com ligação à rede (inversores de rede) e em sistemas autónomos (inversores autónomos). No quadro 2.6 são apresentadas as funções dos dois tipos de inversores [25].

Quadro 2.6: Principais funções dos inversores [25]

Tipo de Inversores	Funções
Inversores de rede	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Conversão da corrente DC em corrente AC, de acordo com os requisitos técnicos e de segurança que estão estipulados para a ligação à rede;</li> <li>• Ajuste do ponto operacional do inversor ao MPP do gerador fotovoltaico (rastreo do ponto MPP);</li> <li>• Registo de dados operacionais e sinalização;</li> <li>• Dispositivos de protecção dos equipamentos ligados ao sistema (desliga automaticamente quando a corrente fornecida é inferior à necessidade dos equipamentos ligados).</li> </ul>
Inversores autónomos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Obter corrente alterna com uma tensão e frequência estáveis;</li> <li>• Ter um bom rendimento de conversão, mesmo quando a bateria não está completamente carregada;</li> <li>• Adaptar condições face a flutuações na tensão da bateria;</li> <li>• Proteger a bateria contra grandes descargas;</li> <li>• Ter protecção contra curto-circuito;</li> <li>• Ter uma boa compatibilidade electromagnética;</li> <li>• Ter protecção contra sobre-tensão.</li> </ul>

Uma vez que o objectivo dos sistemas ligados à rede é fornecer a maior potência eléctrica possível, o inversor deve funcionar no ponto MPP do gerador fotovoltaico. Como já foi visto anteriormente, o

---

ponto MPP do gerador fotovoltaico varia com as condições meteorológicas. No inversor, o sistema de rastreamento MPP, garante que o inversor é constantemente ajustado ao ponto MPP.

### **2.5.2 - Sistema Solar Térmico**

O aproveitamento da energia solar por conversão em energia térmica é feita através de colectores solares. Estas soluções são geralmente aplicadas para:

- produção de Águas Quente Sanitárias (AQS) para o uso em habitações, serviços, etc. com necessidades de consumo regulares ao longo de todo o ano;
- aquecimento de piscinas;
- aquecimento ambiente com piso radiante;
- produção de água a elevadas temperaturas destinada a uso industrial por concentração dos raios solares em colectores parabólicos [22].

Na generalidade das situações os equipamentos solares não garantem a supressão das necessidades de consumo energético, sendo por isso necessário o apoio de uma instalação convencional, que garanta as necessidades energéticas não cobertas pelo sistema solar.

Os sistemas solares são dimensionados tendo em conta as necessidades energéticas médias anuais e o balanço médio anual do consumo energético. Tal não acontece com os equipamentos convencionais que são dimensionados para as condições extremas (inverno, baixa radiação solar) de certos dias do ano e tendo em conta o pico máximo previsível de consumo energético.

Seguidamente serão apresentados os componentes constituintes de um sistema solar padrão, ou seja, um sistema solar mais usualmente utilizado e também utilizado mais à frente nesta dissertação. Os elementos constituintes de um sistema solar padrão são os seguintes [22]:

- colector solar;
- depósito de armazenamento de água;
- circuito solar;
- apoio ao sistema solar (electricidade, gás, etc.).

#### **2.5.2.1 - Colectores solares**

Os colectores solares têm a função de converter a maior quantidade de radiação solar disponível em calor e transferir esse calor com o mínimo de perdas para o sistema. Existem diversos tipos de colectores com diferentes características e aplicações. De seguida vão ser destacados os colectores parabólicos compostos, colectores de tubos de vácuo, colectores concentradores e colectores solares planos, dando maior atenção a esta última solução visto tratar-se da solução adoptada nesta dissertação e se tratar da mais utilizada correntemente.



- **Colector solar plano:**

De forma simplificada, um colector solar plano é composto pela cobertura transparente, a placa absorvora e uma caixa isolada para evitar perdas de calor. Em contacto com a placa absorvora encontra-se uma serpentina de tubos pelos quais circula um fluido térmico [19, 22].

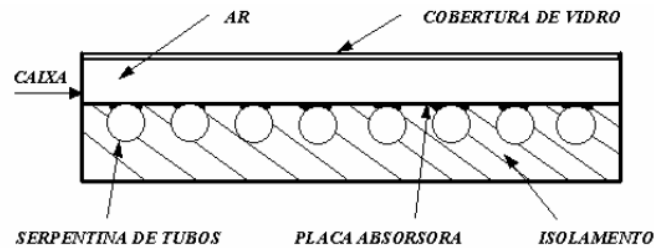


Figura 2.33: Esquema simplificado de um colector solar plano [22]

Na descrição da geometria de um colector plano são consideradas as seguintes áreas:

- a dimensão total (superfície bruta) do colector que corresponde às dimensões exteriores e define, por exemplo, a quantidade mínima de superfície de telhado necessária para a instalação;
- a área da superfície de abertura que corresponde à área através da qual a radiação solar passa para o colector;
- a área de captação que corresponde à área da superfície da placa absorvora [19].

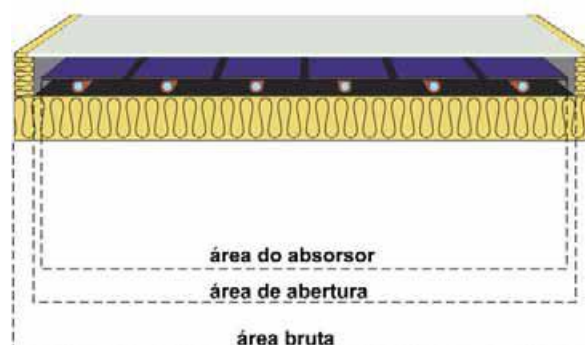


Figura 2.34: Secção transversal com a descrição das diferentes áreas das superfícies [19]

Para a comparação entre diferentes colectores de diferentes fabricantes é importante definir uma superfície de referência, ou seja, a área de superfície para a qual os valores característicos do colector foram desenhados. Para os colectores esta superfície, de acordo com o método definido na Norma Europeia EN 12975 é a área da superfície de abertura [19].

Assim sendo, as coberturas transparentes devem garantir algumas qualidades fundamentais, ou seja, ter boa transparência (perto de 90%), provocar o efeito de estufa e reduzir perdas, melhorando assim o rendimento do colector e assegurar a estanquidade do colector à água e ao ar, devendo resistir à pressão do vento, ao peso do gelo, da neve e aos choques térmicos. Geralmente o material destas coberturas é o vidro e alguns tipos de acrílico. Às coberturas transparentes podem ser aplicados tratamentos especiais, tais como:

- tratamentos anti-reflexo sobre a superfície exterior para diminuir as perdas por reflexão dos raios solares incidentes;
- tratamentos na superfície interior para que reflecta as radiações de elevado comprimento de onda, e não impeça a passagem da radiação de onda curta, para diminuir as perdas por radiação [22].

Outro constituinte, e dos mais importantes dos colectores planos, é a placa absorvora, cuja função é converter a maior quantidade de radiação solar disponível em calor e transferir este calor com o mínimo de perdas ao resto do sistema. Tal placa consiste numa chapa com boas características de absorção de calor (fabricada, por exemplo, em alumínio, cobre ou em várias placas) optimizada com um revestimento preto-baço ou com um revestimento selectivo e os tubos de transferência de calor ligados ao colector. O revestimento selectivo é formado por uma estrutura com diferentes camadas o que permite ter melhor conversão da radiação solar quando comparada com o revestimento preto-baço [19].

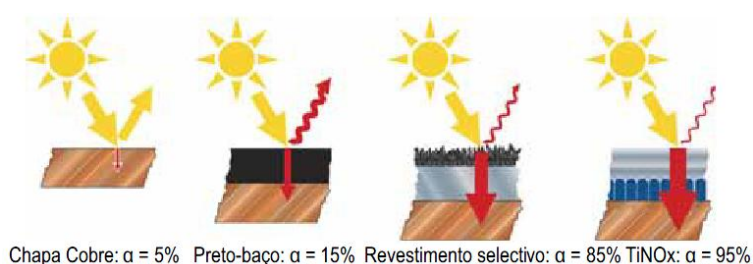


Figura 2.35: Absorção ( $\alpha$ ) e emissão através de superfícies diferentes [19]

Geralmente os revestimentos selectivos mais utilizados são de tratamento electroquímico, como é o caso do crómio-preto ou níquel-preto. No entanto, os últimos desenvolvimentos em revestimentos, levaram ao aparecimento do *TiNOx* (revestimento por deposição física do tipo “*sputtering*”), que para além de apresentar melhor absorção apresenta uma diminuição de consumo de energia e uma diminuição dos impactes ambientais durante a sua produção. Os modelos mais habituais de placas absorvora são [19]:

- duas placas metálicas separadas por alguns milímetros entre as quais circula o fluido (lâmina de água);
- tipo denominado *Roll-Bond*. Estes colectores são formados por duas placas de cobre/alumínio unidas por pressão a quente. O circuito é desenhado com resina e nesse sítio as placas não soldam. O líquido circula nesse circuito impresso;
- placa metálica absorsora, sobre a qual estão soldados os tubos;
- absorsores de plástico (polipropileno), usados quase exclusivamente em aquecimento de piscinas.

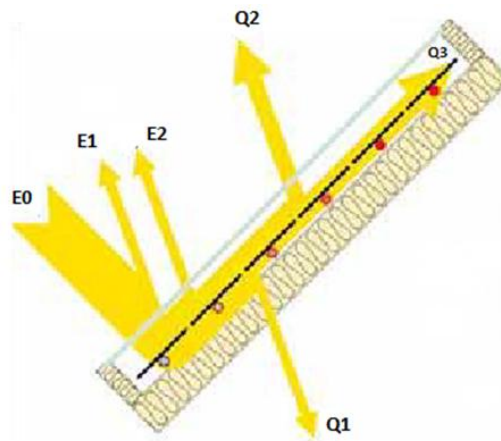


a) Absorvedor de alumínio tipo *Roll-Bond*; b) Absorvedor com o sistema de tubos soldados numa chapa de metal

Figura 2.36: Tipos de Absorvedores [19]

A caixa isolada tem, conjuntamente com a cobertura transparente, como função proteger contra o vento, a chuva, as poeiras, e outras intempéries e ao mesmo tempo ser bem isolada com qualquer tipo de isolamento existente no mercado (preferencialmente isolamento de fibra mineral devido às elevadas temperaturas na ordem dos 150 a 200°C) de modo a reduzir as perdas de calor para o ambiente por condução térmica.

De seguida apresenta-se o esquema funcional de um colector plano. A radiação incidente ( $E_0$ ) mesmo antes de entrar no colector solar é reflectida ( $E_1$ ) nas superfícies internas e externas do vidro. A superfície do absorvedor também reflecte parte da luz ( $E_2$ ) e converte a restante em calor. Com um bom isolante térmico, no interior da caixa, reduz ao máximo as perdas de energia através de condução térmica ( $Q_1$ ). A cobertura transparente tem a função de reduzir perdas na superfície do absorvedor, através de radiações térmicas e convectivas ( $Q_2$ ). Assim sendo, da irradiação de energia solar ( $E_0$ ) e retirando os diferentes tipos de perdas ( $E_1$ ,  $E_2$ ,  $Q_1$  e  $Q_2$ ) fica o calor remanescente ( $Q_3$ ) que está disponível para ser utilizado pelo sistema [19].



E0 - Irradiação; E1 e E2 – Perdas por reflexão; Q1 e Q2 – Perdas térmicas; Q3 – Quantidade de calor disponível

Figura 2.37: Esquema funcional de um coletor plano [19]

Podem ser enumeradas algumas vantagens e desvantagens dos colectores planos [19].

Vantagens:

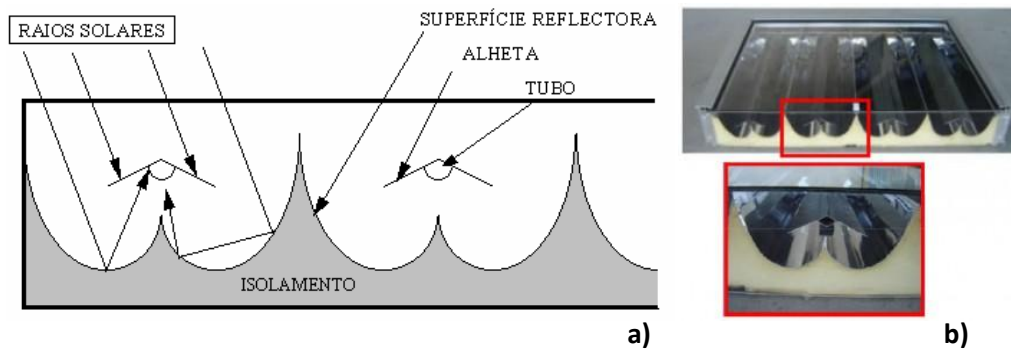
- menos dispendioso que um coletor de vácuo e parabólico composto;
- múltiplas opções de montagem (sobre telhado, integrado no telhado, montado na fachada e de instalação livre);
- tem boa relação de preço/performance;
- permite montagem simples (kits de construção de coletor).

Desvantagens:

- apresenta menor eficiência em relação aos colectores de vácuo e colectores parabólicos compostos (CPCs) devido aos elevados valores de perdas;
- não serve para gerar altas temperaturas, por exemplo, geração de vapor, fornecimento de calor para máquinas de refrigeração;
- exige mais espaço no telhado do que os colectores de vácuo.

#### • Coletor parabólico composto (CPC):

A principal diferença entre os colectores parabólicos compostos e os colectores solares planos é a geometria da superfície de absorção. Nos colectores planos, como foi visto, a superfície é plana à qual estão soldados os tubos. Nos CPCs a área absorvedora é constituída por duas alhetas unidas a um tubo e colocadas em cima de uma superfície reflectora, assim sendo, a captação solar realiza-se nas duas faces e as perdas térmicas são inferiores. As perdas de calor são inferiores porque a área de absorção é inferior, por ser constituída só pela superfície da alheta. A diminuição das perdas implica uma melhoria do rendimento térmico. Por outro lado, a inércia térmica do coletor é inferior e a temperatura nominal de funcionamento é atingida mais rapidamente [22].



a) Efeito dos raios solares sobre a superfície; b)coletor do tipo CPC

Figura 2.38: Funcionamento de um coletor do tipo CPC [22]

Vantagens e desvantagens de um coletor do tipo CPC [19].

Vantagens:

- tem elevada eficiência mesmo com elevadas diferenças de temperaturas entre o absorsor e o meio envolvente;
- tem uma elevada eficiência com baixa radiação;
- suporta aplicações de calor com mais eficiência do que os colectores planos;
- funciona em elevadas temperaturas.

Desvantagens:

- mais dispendioso que o coletor plano.

- **Tubos de vácuo**

Os tubos de vácuo são outra solução existente de colectores solares, este tipo de coletor tem a vantagem de melhorar bastante o efeito de estufa devido ao vácuo existente entre o absorsor e o vidro. Desta forma são anuladas as perdas por convecção e condução. Os colectores de tubos de vácuo consistem num número de tubos, que estão ligados entre si pelo topo através de um distribuidor ou caixa colectora, no qual se localizam o isolamento e as linhas de alimentação e retorno. Existem dois tipos de colectores de tubos de vácuo: escoamento directo e tubo de calor [19, 22].



Figura 2.39: Colectores de tubos de vácuo [19]

Como tem vindo a ser feito para as soluções anteriores vão ser apresentadas as vantagens e desvantagens desta solução [19].

#### Vantagens:

- apresenta boa eficiência, mesmo com elevadas diferenças de temperatura entre o absorvedor e o meio envolvente;
- apresenta boa eficiência com baixa radiação;
- suporta cargas térmicas com mais eficiência do que os colectores planos;
- atinge elevadas temperaturas, possibilitando a utilização em sistemas de ar condicionado e produção de vapor;
- facilmente transportado para qualquer local (apresenta um baixo peso e pode ser montado no local da instalação);
- através da afinação das placas absorvedoras (na montagem, na fábrica ou durante a instalação) estas podem ser alinhadas em direcção ao sol (no caso de certos produtos);
- colectores de tubos de fluxo-directo podem ser montados horizontalmente num telhado plano, providenciando menores perdas térmicas, devido ao vento e menores custos de instalação evitando-se a remoção de material do telhado e mantendo a sua estrutura intacta.

#### Desvantagens:

- geralmente mais caro que um colector plano (apesar de já existirem marcas bastante competitivas);
- não pode ser usado para instalações horizontais no caso dos sistemas de tubos de calor (inclinação no mínimo de 25°).

### **2.5.2.2 - Depósitos de armazenamento**

Raramente a energia fornecida pelo Sol coincide com as necessidades de energia térmica e não pode ser controlada. Visto isto, é necessário armazenar a energia térmica gerada para ser utilizada quando necessário. De acordo com as aplicações diferenciam-se os depósitos de armazenamento tendo em conta a força de compressão e o material. Os depósitos de armazenamento estão disponíveis em aço inoxidável, esmaltados ou revestidos em plástico. Existem três tipos de depósitos de armazenamento [19]:

- depósitos de armazenamento de água potável;
- depósitos de armazenamento regulador;
- depósitos de armazenamento combi.

- **Depósitos de armazenamento de água potável:**

Os depósitos de armazenamento de água potável têm as seguintes características:

- dois permutadores de calor para duas fontes de calor (bivalente);
- ligação directa ao reservatório de água fria;
- pressão de operação do tanque variável entre 4-6 bar.

- **Depósitos de armazenamento de regulação:**

O depósito de armazenamento de regulação é um tanque de aço (tanque de pressão) ou tanque de plástico não pressurizado com água para aquecimento ambiente. O calor armazenado neste tanque pode ser introduzido directamente no sistema de aquecimento ou transferido através de um permutador de calor para a água potável.

- **Depósitos de armazenamento combinados:**

O depósito de armazenamento combinado consiste numa combinação de um tanque regulador e um depósito de armazenamento de água potável. Estes tanques são apropriados para usar em sistemas solares para aquecimento de água com ou sem suporte de aquecimento.

### **2.5.2.3 - Circuito Solar**

O calor gerado pelos colectores é transportado para os tanques de armazenamento solar, através do circuito solar. Este circuito é constituído pelos seguintes elementos:

- tubagens: permitem a ligação dos colectores aos tanques de armazenamento que muitas vezes são instalados na cave dos edifícios;

- 
- fluido de transferência térmica: transporta o calor do colector para o tanque de armazenamento;
  - bomba solar: faz circular o fluido de transferência térmica no circuito solar;
  - permutador de calor do circuito solar: transfere o calor para a água potável no tanque de armazenamento;
  - equipamento e acessórios para enchimento, esvaziamento e drenagem;
  - equipamento de segurança: vaso de expansão e válvula de segurança que protegem o sistema de danos (perdas) devido à expansão do fluido térmico.

As tubagens são necessárias para a transferência de calor entre o colector e o tanque de armazenamento. O cobre é o material mais utilizado, por ser tecnicamente adequado e economicamente competitivo. O isolamento destas tubagens é um factor muito importante para a diminuição das perdas térmicas e para o melhor rendimento do sistema solar.

O fluido de transferência térmica geralmente utilizado é a água devido às seguintes características:

- capacidade térmica elevada;
- condutividade elevada;
- baixa viscosidade;
- não entra em combustão;
- não tem toxicidade;
- é barata.

Mas, uma vez que a temperatura de operação destes sistemas é entre os  $-15^{\circ}\text{C}$  e os  $+350^{\circ}\text{C}$  é necessário a adição do glicol (anticongelante) baixando assim o ponto de congelamento e aumentando a temperatura de ebulição do fluido.

A circulação do fluido de transferência térmica pode realizar-se de duas maneiras: circulação forçada através da colocação de uma bomba ou circulação natural (termossifão). A utilização de circulação por termossifão é apenas possível caso o depósito esteja colocado num nível superior aos colectores solares. Este tipo de circulação é aconselhável em pequenas instalações, pois é um sistema auto-regulado, isento de partes mecânicas ou controlos electrónicos e que não consome energia adicional. Contudo, a colocação do depósito a um nível superior relativamente aos colectores pode ser problemático em termos de garantia do tempo de exposição à radiação solar [19; 22].





Figura 2.40: Sistema termossifão [19]

Caso a aplicação do depósito acima dos colectores não seja possível ou desejada recorre-se à circulação forçada do fluido por intermédio de uma bomba.

---

## **CAPÍTULO III**

### **ENQUADRAMENTO DO TRABALHO NUMÉRICO**

#### **3.1- Considerações iniciais**

Apresentam-se neste capítulo as ferramentas de cálculo utilizadas no estudo numérico no presente trabalho. Esta análise pretende, introduzir justificar de forma sucinta e prática os princípios e métodos de funcionamento das ferramentas de simulação e as suas limitações.

O presente capítulo é dividido em duas secções distintas:

Na secção 3.2, são apresentadas as ferramentas de simulação existentes e as utilizadas na dissertação;

#### **3.2- Ferramentas de simulação existentes**

Antes de se optar pela utilização de um sistema solar térmico e fotovoltaico, deve-se recorrer a uma análise de desempenho energético com o objectivo da optimização dos diversos parâmetros associados. Estas análises realizadas com recurso a simulações são essenciais para garantir o funcionamento adequado ao longo da vida útil dos equipamentos, um dimensionamento excessivo ou diminuto do sistema ou a execução de um sistema sem custos excessivos de manutenção. Como foi visto anteriormente, existem amplos leques de soluções possíveis para o estudo do desempenho das soluções solares existentes, razão pela qual a escolha das ferramentas de simulação deverá resultar duma análise crítica das potencialidades e limitações associadas a cada uma delas e escolhidas de acordo com as necessidades ou as intenções de aplicação. Os resultados destas simulações permitem estimar, além do potencial de produção de energia térmica ou eléctrica, orçamentos e níveis de emissões, entre outros.

Existem variados tipos de ferramentas de simulação para o cálculo de sistemas solares. As ferramentas podem ser bastante específicas em determinadas soluções ou aplicações ou podem ser mais dinâmicas e flexíveis, tornando-se assim mais complexas para o utilizador em termos dos dados que lhe são pedidos.

---

Do ponto de vista dos sistemas solares térmicos, as ferramentas existentes podem ser classificadas em três categorias: (i) Programas de cálculo, (ii) Programas de etapas e (iii) Programas de simulação [19]:

- Programas de cálculo. São programas simples e baseiam-se em processos de cálculo estático. Geralmente utilizam valores médios mensais de diferentes locais. Exemplos de programas de cálculo:
  - F-Chart;
  - Energizer;
  - Luftikuss.
  
- Programas de etapas. Permitem uma avaliação mais dinâmica, num ciclo de tempo particular. Realizam simulações com base em dados atmosféricos e valores de consumo. Exemplos de programas de etapas:
  - SolTerm;
  - T\*SOL;
  - Polysun;
  - GetSolar;
  - Gombis (Praxosol).
  
- Programas de simulação. Utilizados para sistemas solares de grandes dimensões (mais de 100m<sup>2</sup>). Quase todo o tipo de configuração do sistema e condições de operação podem ser simulados. Apresentam uma maior dificuldade de utilização. Exemplos de programas de simulação:
  - TRNSYS;
  - TRNSAIR;
  - DK-Solar;
  - SMILE.

Em termos de ferramentas de simulação de sistemas solares fotovoltaicos, estas também podem ser classificadas em três categorias: (i) Programas de cálculo, (ii) Programas de simulação por passo de tempo e (iii) Programas de sistemas [18]:

- Programas de cálculo. São programas de análise elementar baseados em métodos estatísticos e de combinação de cálculos simples. Geralmente são baseados em valores mensais, são menos flexíveis e fornecem resultados de forma expedita. Este tipo de programas é pouco utilizado. Exemplos de programas de cálculo:
  - PV F-chart;
  - PV-calc.

- Programas de simulação por passo de tempo. São os mais utilizados devido à larga aplicação. Utilizam dados meteorológicos, normalmente em intervalos horários e pretendem reproduzir o mais fielmente possível a realidade. O sistema pode ser simulado em intervalos horários ou inferiores a uma hora. Exemplos de programas de simulação por passo de tempo:
  - DASTPVPS;
  - Greenius;
  - PV-DesignPro (Solar Studio Suite);
  - PVS;
  - PV\*SOL;
  - PVsyst;
  - SOLDIM;
  - SolEm;
  - SolTerm.
  
- Programas de sistemas. São utilizados quando os sistemas a simular vão para além dos limites dos programas anteriores ou caso se queira calcular novas variantes de componentes e de sistemas. No entanto, é necessário um treino considerável para que seja possível aproveitar as suas vantagens. São os mais apropriados para efeitos de investigação e desenvolvimento. Exemplos de programas de sistemas:
  - INSEL;
  - SMILE;
  - TRNSYS.

Feita esta breve introdução aos diversos tipos de programas existentes, de seguida vão ser focados apenas as ferramentas utilizadas na parte numérica desta dissertação, nomeadamente o SolTerm e o PVsyst, para a simulação do sistema solar térmico e para o sistema solar fotovoltaico, respectivamente.

### **3.2.1- SolTerm**

O SolTerm é, como foi referido anteriormente, um *software* de análise de desempenho de sistemas solares por etapas [19] desenvolvido pelo Laboratório Nacional de Energia e Geologia – LNEG e é tido como referência para o cálculo de incentivos governamentais à energia solar. Este *software* pode

---

ser utilizado tanto para sistemas solares térmicos como para sistemas solares fotovoltaicos e está especialmente adaptado às condições climáticas e técnicas de Portugal.

O SolTerm é um *software* indicado (pelos autores) para:

- estudos de viabilidade de aplicação de energia solar;
- optimização de componentes e sistemas;
- pré-dimensionamento e dimensionamento de sistemas solares;
- elaboração de cadernos de encargos, apreciação de propostas em concursos públicos;
- avaliação objectiva e independente de projectos;
- educação e sensibilização em energia e sustentabilidade.

A simulação de sistemas solares térmicos através do SolTerm é feita em condições quasi-estacionárias, isto é, os balanços energéticos no sistema são simulados em curtos intervalos de tempo (5 minutos), durante os quais são assumidos constantes o estado do ambiente e do sistema solar. Nas simulações executadas pelo SolTerm são necessárias informações sobre [2]:

- configuração/dimensionamento do sistema;
- estratégias de controlo e operação;
- radiação solar horizontal e temperatura ambiente em base horária;
- obstruções, sombreamentos, albedo das redondezas, turbidez da atmosfera;
- características técnicas dos componentes (colectores, armazenamento, tubagens, etc.);
- consumo (ou “carga”) do sistema em base horária média mensal.

O SolTerm armazena estas informações segundo categorias e em bancos de dados que podem ser geridos e expandidos pelo utilizador. Existe um banco de 308 Anos Meteorológicos de Referência (AMR), um ano para cada concelho de Portugal, apropriados para a simulação de sistemas solares e para a avaliação do desempenho energético de edifícios. Estes anos de referência foram elaborados e publicados pelo INETI e obtidos com base na interpolação espacial de dados observados em estações do Instituto Português de Meteorologia de 1961-1990 combinados com dados elaborados pelo INETI. Este banco de dados é muito eficiente e preciso quando se trata de simulações em território nacional, pois tem em conta microclimas existentes. Tal não acontece quando são utilizadas bases de dados obtidas via satélite ou baseadas em previsões climáticas [2].

Este banco de dados possui informações sobre a irradiação solar horizontal, tanto directa como difusa e das temperaturas ambientes máxima, média e mínima (Figura 3.1). Como será fácil de compreender todos os restantes detalhes do local deverão ser indicados pelo utilizador. Todas as obstruções

existentes podem ser indicadas no programa de NW a NE tendo em atenção que o efeito das obstruções é o de impedir a chegada de radiação directa e de radiação difusa aos colectores, e é mais crítico entre SE e SW, a zona onde deve ser assegurada a melhor exposição solar.

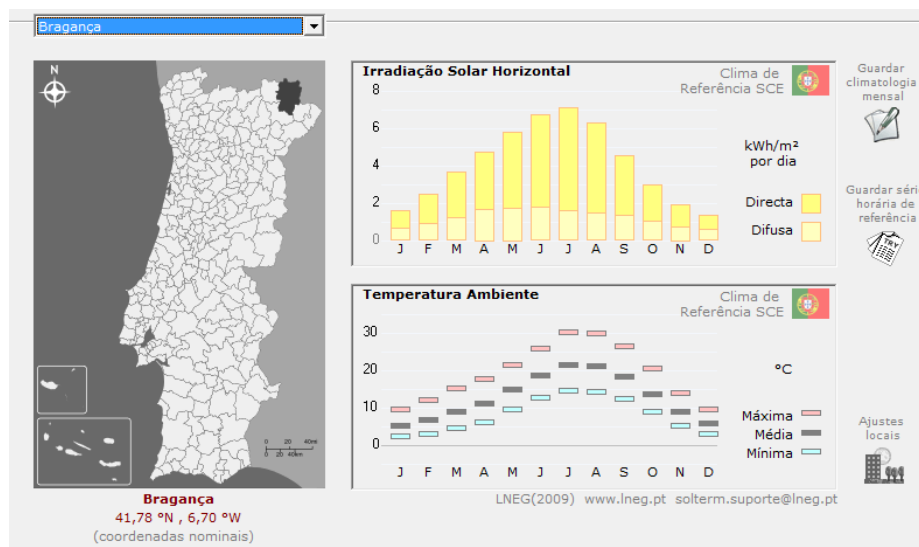


Figura 3.1: Exemplo do interface e valores apresentados na escolha do local [3]

O albedo do solo é a fracção de radiação incidente na superfície terrestre, que é reflectida em todas as direcções. Geralmente assume-se como sendo 20%, pois a variação deste componente pouco faz alterar o recurso solar e apenas se justifica para situações muito especiais.

A turbidez da atmosfera reflecte a quantidade de aerossóis e poeiras, sejam de origem humana ou natural, que existem na atmosfera no local de colocação dos colectores solares térmicos. Esta turbidez reduz em particular a incidência da radiação directa. Apesar disto este parâmetro tem pouco impacto no recurso solar, a não ser que se trate de situações extremas (altas montanhas, zonas muito poluídas) e para colectores concentradores de alta concentração. Para as restantes situações a sua variação pode ser desprezada, por isso é tomado o valor médio assumido como típico.

Além do banco de dados correspondente aos dados climáticos, o SolTerm possui um banco de dados de colectores e “kits” de tecnologia solar térmica (que até à data se encontram testados e certificados segundo as regras europeias da marca Solar Keymark ou Certif), e que pode ser actualizado constantemente pelo utilizador. Os restantes bancos de dados (depósitos, permutadores, etc...), apesar de não serem tão exaustivos como os anteriores, também possuem um conteúdo substancial [2].

A configuração de um sistema solar térmico inclui: um circuito primário (solar) constituído por um campo de colectores ligados por um permutador a um depósito e um circuito secundário (cargas) que interliga tomadas de água quente no depósito, cargas térmicas e abastecimento de água ao depósito,

por norma existe também um sistema de apoio que complementa o sistema solar de forma a atingir a temperatura desejada [2, 3].

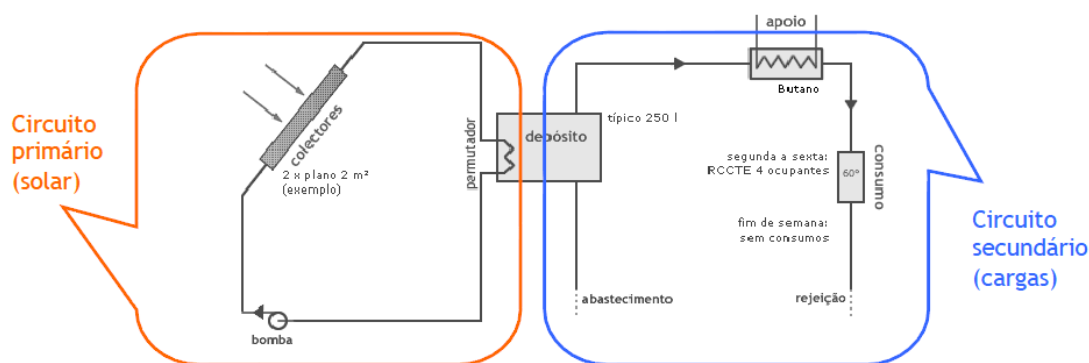


Figura 3.2: Esquema dos sistemas primário e secundário do SolTerm [2]

Os sistemas solares incluem muitos outros componentes e interligações (sensores de temperatura, válvulas, sistemas de enchimento e purga, etc.), mas uma vez que o SolTerm se baseia em simulações de balanços energéticos não é necessário considerar estes componentes para uma boa estimativa.

Uma vez que, como se poderá ver no Capítulo IV, a solução adoptada nesta dissertação trata-se de um sistema solar térmico com depósito e não uma solução tipo “kit”, vai ser dada especial atenção às opções e variantes existentes para este tipo de soluções. O SolTerm tratando-se de um programa indicado como referência para o cálculo de incentivos à energia solar e para a contabilização da contribuição de sistemas de energias renováveis para o balanço energético de edifícios, possui a opção de escolha de um coletor padrão segundo o RCCTE com as dimensões de  $1\text{m}^2$  por ocupante da habitação. Também o consumo energético pode ser definido como o consumo regulamentar do RCCTE, tendo em conta a variação de temperatura e as necessidades de AQS estabelecidas por este mesmo regulamento. Este consumo energético, apesar de padrão, pode ser diferenciado de mês para mês e de dias úteis para fins-de-semana.

Em termos de depósitos existem também algumas opções no banco de dados, podendo estas ser modificadas em termos de tipos de permutadores (interno, externo, de camisa), a localização do depósito (interior, exterior), a sua posição (horizontal, vertical), o material constituinte (cobre, aço inox, plástico, metal vitrificado), as características geométricas (volume, área externa) e os coeficientes de perdas térmicas (o SolTerm possui uma ferramenta de sugestão com base nas características anteriores). Outras características podem ser modificadas como o fluido circulante no circuito primário, o tipo de tubagem e o seu isolamento no circuito primário, mas não vai ser dada muita importância a essas características nesta dissertação [2].

Após a definição de todas estas características, pode-se proceder à simulação do sistema solar térmico. Apresenta-se na figura 3.3 um exemplo de análise energética realizada pelo SolTerm.



Desempenho do sistema térmico						Évora
Projecto: aferição sistema 200 l forçado						
	Rad.Horiz.	Rad.Inclin.	Desperdiçado	Fornecido	Carga	Apoio
	kWh/m <sup>2</sup>	kWh/m <sup>2</sup>	kWh	kWh	kWh	kWh
Janeiro	67	114	,	114	260	145
Fevereiro	83	121	,	116	234	118
Março	124	151	,	144	260	115
Abril	159	168	,	162	251	89
Maio	203	191	,	191	260	69
Junho	217	193	,	200	251	51
Julho	238	217	,	232	260	27
Agosto	216	218	,	238	260	22
Setembro	155	180	,	204	251	47
Outubro	111	154	,	173	260	87
Novembro	75	123	,	129	251	123
Dezembro	62	109	,	112	260	147
Anual	1709	1939	,	2015	3056	1040
Rendimento global anual do sistema: 26%						Fracção solar: 66,0%
						Produtividade: 504 kWh/[m <sup>2</sup> colector]

Figura 3.3: Exemplo da análise energética do SolTerm [3]

Onde [3],

- Rad.Horiz. – é a energia da radiação solar global na horizontal (kWh/m<sup>2</sup>);
- Rad.Inclin. – é a energia da radiação solar global no plano dos colectores (kWh/m<sup>2</sup>);
- Desperdiçado – é a energia acumulada em excesso, dissipada (kWh);
- Fornecido – é a energia fornecida ao consumo pelo sistema solar (kWh);
- Carga – é a energia pedida pelo consumidor (kWh);
- Apoio – é a energia fornecida pelo sistema de apoio (kWh).

### 3.2.2- PVsyst

O PVsyst é uma ferramenta de dimensionamento e simulação de sistemas solares fotovoltaicos do tipo de simulação por passo de tempo [18] desenvolvido pela Universidade de Genebra em 1991. Trata-se de um software utilizado para o estudo, dimensionamento e análise de dados de sistemas fotovoltaicos. Trata-se de um dos softwares mais utilizados na simulação de sistemas fotovoltaicos pela sua variada aplicação (em [5, 34, 36, 47]).

O PVsyst permite simular sistemas com ligação à rede, autónomos e outras situações especiais (sistemas para bombagem entre outros) e inclui extensas bases de dados meteorológicos de diferentes locais e de diversos componentes de sistemas fotovoltaicos (módulos fotovoltaicos, inversores, reguladores de carga, etc) bem como ferramentas gerais de apoio ao aproveitamento da energia solar [39]. Apresenta-se na figura 3.4 o interface de apresentação inicial do programa PVsyst.

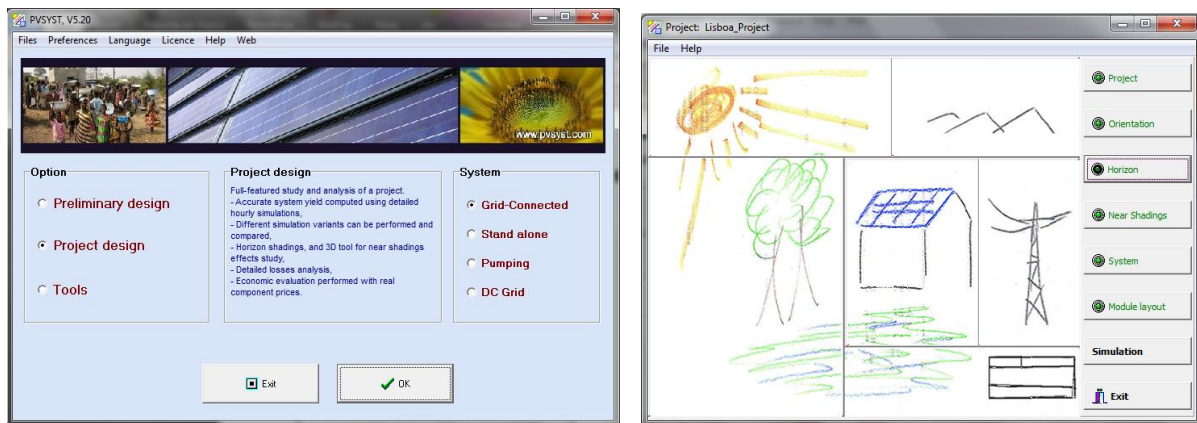


Figura 3.4: Apresentação do interface geral do PVsyst [28]

O PVsyst pode ser utilizado consoante as necessidades dos utilizadores, quer sejam engenheiros, arquitectos ou investigadores podendo também ser utilizado sob o ponto de vista educacional. O PVsyst pode ser utilizado em diversas fases de desenvolvimento de um projecto [39]:

- “*Preliminary Design*” – ou seja, trata-se do pré-dimensionamento de um projecto. Trata-se de um modo onde pode ser feita uma simulação rápida com valores médios mensais, apenas disponibilizando algumas características gerais do sistema sem especificar componentes;
- “*Project Design*” – este é o segundo modo do PVsyst onde é feito um dimensionamento completo do sistema fotovoltaico detalhado de hora em hora;
- “*Measure Date Analysis*” – é o terceiro modo disponível para casos em que o sistema é executado e montado e é utilizado para análises de comparação entre valores simulados e valores medidos.

No âmbito do presente trabalho o PVsyst foi utilizado recorrendo ao segundo modo, ou seja, “*Project Design*” devido ao facto de ser o mais indicado ao tipo de análise que se pretende realizar. Neste segundo modo, para fazer as simulações, o utilizador começa por definir a orientação do plano (com a possibilidade de módulos de seguimento solar, dupla orientação ou montagem fixa), e escolher os componentes específicos do sistema. O programa assiste o utilizador na elaboração do sistema fotovoltaico, ou seja, define o número de módulos em série e paralelo consoante o modelo de inversor escolhido. Assim deste modo, não é ultrapassado o valor de potência máximo suportado pelo inversor. Numa segunda fase da simulação o utilizador pode especificar parâmetros mais detalhados e analisar efeitos mais específicos, como comportamento térmico, diversas perdas do sistema (cabos, qualidade dos módulos, ângulos de incidência), sombreamentos no horizonte e até mesmo uma ferramenta de desenho da geometria completa do sistema com a indicação dos sombreamentos parciais de objectos próximos do sistema fotovoltaico. A existência de uma animação permite esclarecer os impactos dos

sombreamentos sobre o sistema fotovoltaico. Na Figura 3.5 mostra-se um exemplo da aplicação desta ferramenta [46].

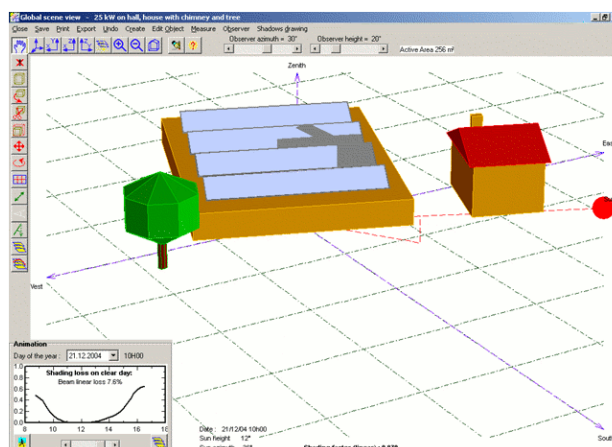


Figura 3.5: Exemplo da ferramenta de desenho do sistema fotovoltaico e da animação de verificação de sombreamentos [46]

Do ponto de vista dos relatórios disponibilizados pelo programa, destaca-se o diagrama de perdas (Figura 3.6) que é particularmente útil para a identificação e discriminação dos diversos tipos de perdas associadas ao sistema e de onde estas ocorrem.

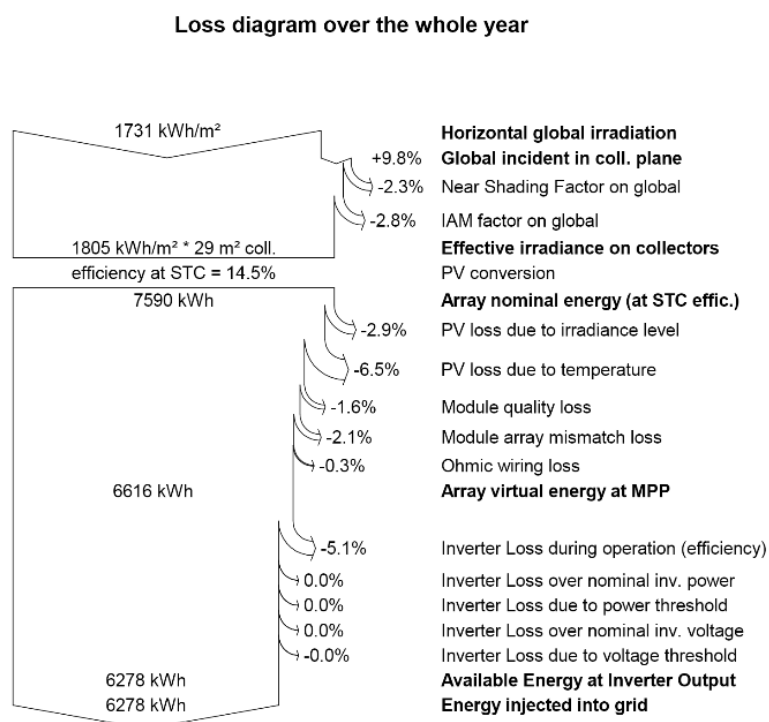


Figura 3.6: Exemplo de um diagrama de perdas obtido através do PVsyst [28]

---

## **CAPÍTULO IV**

### **TRABALHO NUMÉRICO**

#### **4.1- Considerações iniciais**

Neste capítulo são apresentados os casos de estudo utilizados para a elaboração deste trabalho numérico em conjunto com os resultados obtidos. São igualmente apresentados os pressupostos assumidos em cada caso indicando ao mesmo tempo os campos de preenchimento utilizados para efeitos de configuração dos sistemas. No fim do capítulo são ainda apresentadas comparações consumo versus necessidades sob o ponto de vista crítico de alcance do estatuto *nZEB*.

Os programas de simulação utilizados na análise numérica desta dissertação são o PVsyst e o SolTerm para a simulação de sistemas solares fotovoltaicos e de sistemas solares térmicos respectivamente.

#### **4.2- Metodologia de simulação**

Para estudar o potencial aproveitamento dos sistemas solares térmicos e fotovoltaicos para o balanço energético dos edifícios residenciais unifamiliares foi concebido um caso de estudo constituído por um edifício de habitação unifamiliar (moradia) de geometria simples, tal como se pode observar na figura 4.8. O edifício com dimensões geométricas de 7x10x3 metros de largura, comprimento e altura respectivamente, perfazendo assim uma área de pavimento de 70m<sup>2</sup> e um volume interior de 210m<sup>3</sup> e admite-se ser habitado por 4 pessoas, cujo perfil de ocupação em termos de utilização dos equipamentos de preparação de AQS é similar ao assumido pelo RCCTE. O estudo do potencial aproveitamento dos sistemas solares para o balanço energético deste tipo de edifícios baseia-se numa metodologia que admite a inserção do edifício em diversas zonas climáticas de Portugal e na adopção dos valores limite das necessidades energéticas assumidas pelo RCCTE. Na apresentação dos resultados e da metodologia adoptada, numa primeira fase serão abordadas as simulações efectuadas para o sistema solar fotovoltaico, sendo as simulações efectuadas para o sistema solar térmico apresentadas numa fase posterior.

---

#### 4.2.1 - Simulação do sistema solar fotovoltaico

Admite-se que todos os sistemas fotovoltaicos simulados neste trabalho são sistemas com ligação à rede. Esta opção foi tomada por ser mais adequada ao objectivo de alcançar o estatuto *nZEB* e por apresentar o maior potencial de aplicação devido às limitações técnico-financeiras, pois estes não necessitam de componentes acumuladores de energia, uma vez que a rede eléctrica funciona como um grande acumulador de energia, recebendo toda a energia produzida durante o dia e fornecendo energia à habitação durante a noite, tornando-os mais económicos e viáveis.

Os sistemas fotovoltaicos desenvolvidos serão enquadrados no Decreto-Lei n.º363/2007 de 2 de Novembro (que estabelece o regime jurídico aplicável à produção de electricidade por intermédio de unidades de microprodução), com as alterações introduzidas pelo Decreto-Lei n.º118-A/2010, ou seja, a simulação de sistemas fotovoltaicos com ligação à rede eléctrica cujas potências não ultrapassem os 50% da potência contratada até um limite de 3.68kWp (para moradias), sendo assim atribuído o regime de remuneração bonificado.<sup>1)</sup>

Tendo em conta o limite de potência estar fixado aos 3.68kWp vai utilizar-se para todas as soluções o inversor *SunnyBoy* SB 3800V. Este inversor é limitado em potência pelo fabricante ao regime de microprodução português com vista a obedecer aos critérios para a obtenção da tarifa bonificada. O inversor SB 3800V está equipado com a tecnologia de seguimento do ponto de máxima potência (MPPT), o que permite assim que o sistema fotovoltaico funcione sempre no seu ponto de potência máxima para várias condições de radiação e temperatura.

O edifício em estudo apresenta uma cobertura plana, facilitando assim a colocação dos sistemas solares fotovoltaico e térmico com a orientação e inclinação desejadas. Para o edifício em estudo admite-se ter soluções construtivas elaboradas de acordo com as “de referência” caracterizadas pelo RCCTE. Pretende-se com este tipo de abordagem que os consumos associados às necessidades de aquecimento e arrefecimento ambiente sejam equivalentes aos valores máximos admissíveis estipulados para efeitos regulamentares no RCCTE. Para simplicidade, é considerado que não existem obstruções à radiação solar, tanto nas imediações do edifício como no horizonte, para além daquelas provenientes dos próprios módulos fotovoltaicos e colectores solares térmicos.

Na figura seguinte é apresentado o esquema que mostra simplificadaamente os vários passos seguidos no processo de simulação dos modelos simulados com recurso ao programa de simulação PVsyst.

---

<sup>1)</sup>Para a atribuição do regime bonificado é ainda necessário que seja também instalado um sistema com 2m<sup>2</sup> de colectores solares térmicos. No dia 6 de Fevereiro de 2012 foi suspensa a atribuição de potências de injeção na Rede Eléctrica de Serviço Público (RESP) para a produção em regime especial, ou seja, na prática reflecte-se na suspensão deste regime devido à implementação das medidas dos Memorandos de Entendimento acordados com o Fundo Monetário Internacional [8]

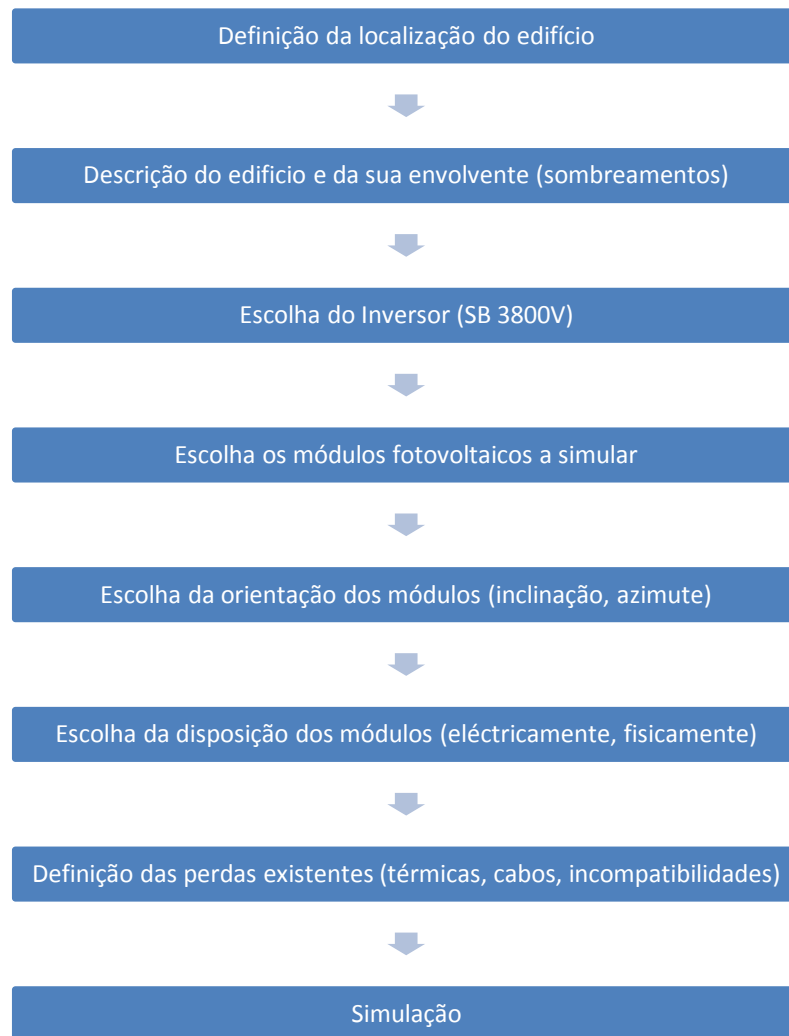


Figura 4.1: Modelo ilustrativo do processo de simulação de sistemas fotovoltaicos através do programa PVsyst

Para se proceder à simulação dos sistemas fotovoltaicos começou-se por converter e importar os ficheiros climáticos do SolTerm para o PVsyst através da ferramenta “*Import ASCII meteo files*” disponível no PVsyst. Deu-se preferência à utilização dos ficheiros do SolTerm em vez dos ficheiros da base de dados Meteonorm existentes no PVsyst, pois como foi referido anteriormente, como se tratam de simulações em Portugal (Bragança, Porto, Lisboa, Évora, Faro) este banco de dados considera-se mais adequado e rigoroso que o correspondente do PVsyst. Outra razão para esta escolha está relacionada com o facto de o SolTerm também ser utilizado no âmbito do presente estudo, apresentando-se assim todos os resultados obtidos em função da mesma base de dados climáticos.

#### 4.2.1.1 - Definição do projecto e da localização do edifício

Como foi referido anteriormente, o PVsyst permite a criação de diversas variantes do mesmo projecto para a mesma zona climática, permitindo assim alterar com facilidade os parâmetros do módulo fotovoltaico consoante os objectivos (Figura 4.2).

Esta interface serve, para além da criação dos diferentes projectos e variantes, para a escolha das localizações e dos ficheiros climáticos para o projecto em causa.

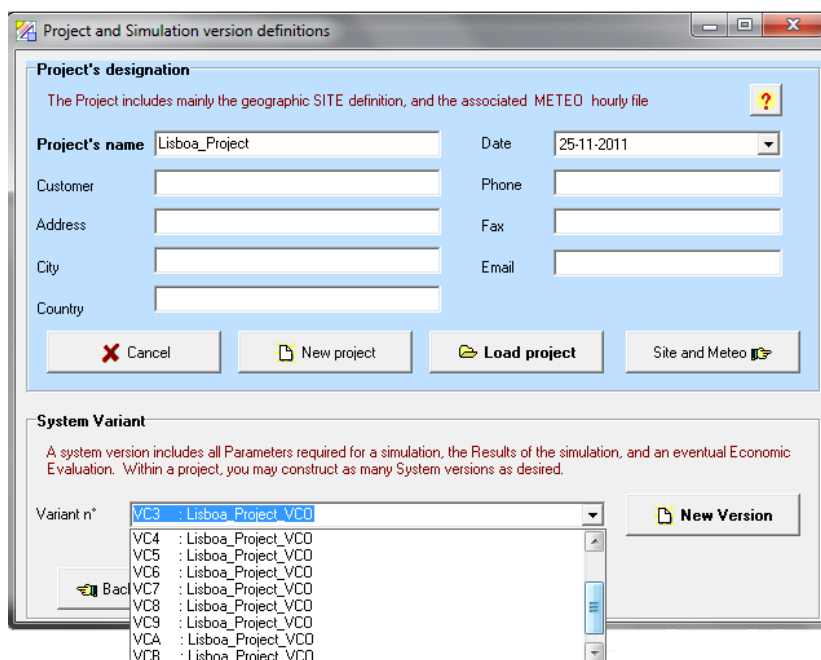


Figura 4.2: Campo “Project” do PVsyst com exemplo de diferentes variantes de um projecto [28]

#### 4.2.1.2 - Definição da orientação e inclinação dos módulos fotovoltaicos

Com recurso à interface “Orientation” foram definidas a orientação e a inclinação dos módulos instalados, tendo-se optado por uma inclinação de 30° e uma orientação para Sul (Azimute 0°). Esta escolha baseia-se nas recomendações válidas para o melhor aproveitamento da irradiação disponível, tal pode ser comprovado através da figura 2.14 e através da optimização sugerida pelo próprio PVsyst (Figura 4.3). Os módulos fotovoltaicos simulados no âmbito deste trabalho vão ser do tipo plano inclinado fixo (“Fixed Tilted Plane”).



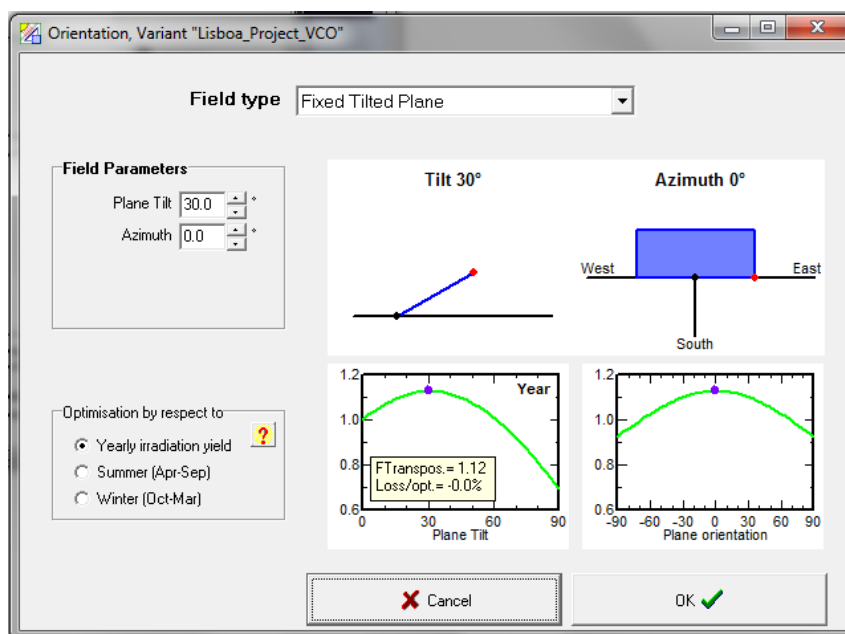


Figura 4.3: Campo “Orientation” do PVsyst com optimização de inclinação [28]

#### 4.2.1.3 - Definição de sombreamentos distantes

A definição dos sombreamentos distantes existentes no horizonte circundante aos módulos fotovoltaicos é efectuada na interface “Horizon”. Por sombreamentos distantes entende-se como sombreamentos que estejam localizados a uma distância de pelo menos vinte vezes o tamanho dos módulos fotovoltaicos.

No caso em estudo no presente trabalho nenhuns sombreamentos distantes são considerados, visto tratar-se de uma simulação de uma situação genérica sem local específico, podendo assim ser considerada uma situação “ideal”, ou seja, sem sombreamentos pelo menos deste tipo.

#### 4.2.1.4 - Caracterização do edifício e de todos os componentes

Com auxílio da interface “Near shadings” são obtidos os factores de sombreamento devidos a objectos próximos que produzam sombreamentos sobre os módulos fotovoltaicos. Por este tipo de sombreamentos entende-se como sendo sombreamentos parciais que afectam apenas parte do sistema fotovoltaico. A zona afectada pelo sombreamento muda durante o dia e ao longo das estações do ano. Esta etapa é iniciada com a definição da geometria do edifício, do sistema solar fotovoltaico e da envolvente destes (“Construction/Perspective”). É de referir que a orientação do edifício corresponde à da figura 4.8.

Devido ao facto do colector solar térmico ser responsável por sombreamentos sobre os módulos fotovoltaicos, a sua geometria foi introduzida com recurso à ferramenta “Elementary Shading Object”. Uma vez que vão ser utilizados colectores solares “padrão”, como se trata de um equipamento fictício,

para definir a área correspondente recorreu-se à ficha técnica de um colector solar existente no mercado (marca Vulcano) cujas proporções são conhecidas. Este colector foi colocado a uma distância de segurança de um metro dos limites do edifício, esta distância é obtida com base na ficha técnica do colector solar.

Por fim foram definidos os módulos fotovoltaicos através da ferramenta “*PV plane in sheds*”, onde foram definidas as dimensões dos módulos fotovoltaicos e o afastamento entre fiadas. Esta fase foi executada após ter sido definido o número de módulos necessários. A área de módulos fotovoltaicos vai ser diferente consoante o modelo ou a tecnologia utilizada.

Optou-se pela colocação dos módulos fotovoltaicos na horizontal em vez de na vertical, pelo facto de acarretar menores efeitos negativos devido ao vento e ao risco de acumulação de sujidades. É de referir que caso ocorra acumulação de sujidades na parte inferior do módulo, esta sujidade apenas vai afectar uma série de células fotovoltaicas, como se pode observar pela figura seguinte. Outra razão é por uma questão de estética visual que na horizontal é melhorada.

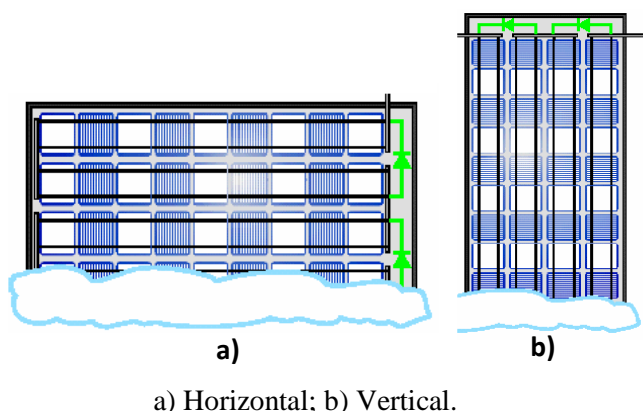


Figura 4.4: Esquema ilustrativo das séries afectadas por acumulação de sujidade em diferentes situações de instalação (adaptado de [18])

A determinação da distância entre fiadas de módulos fotovoltaicos (“*Pitch*”) foi feita através da ferramenta “*Shading/optimisation of sheds*”. Esta distância necessita de ser calculada para cada localização e tipo de módulo fotovoltaico, pois tanto a posição do Sol como as dimensões dos módulos são diferentes. Na determinação desta distância teve-se em atenção o gráfico de sombreamentos (Figura 4.5) e colocou-se as fiadas de módulos fotovoltaicos de modo a que a radiação solar entre as 10h-14h, ou seja,  $\pm 2h$  antes e depois do meio-dia solar não seja obstruída (Figura 4.6).

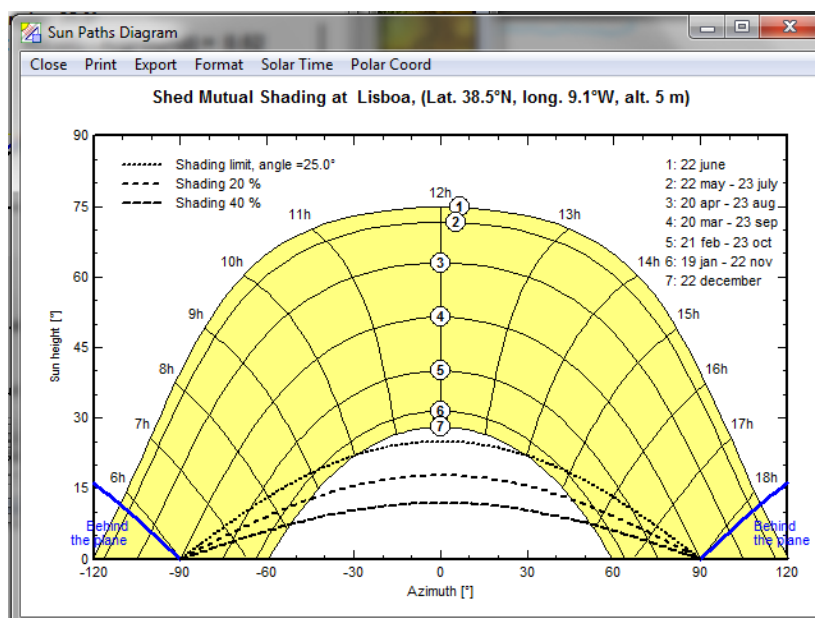


Figura 4.5: Gráfico de sombreamentos para Lisboa solução Fluitecnik FTS 280P [28]

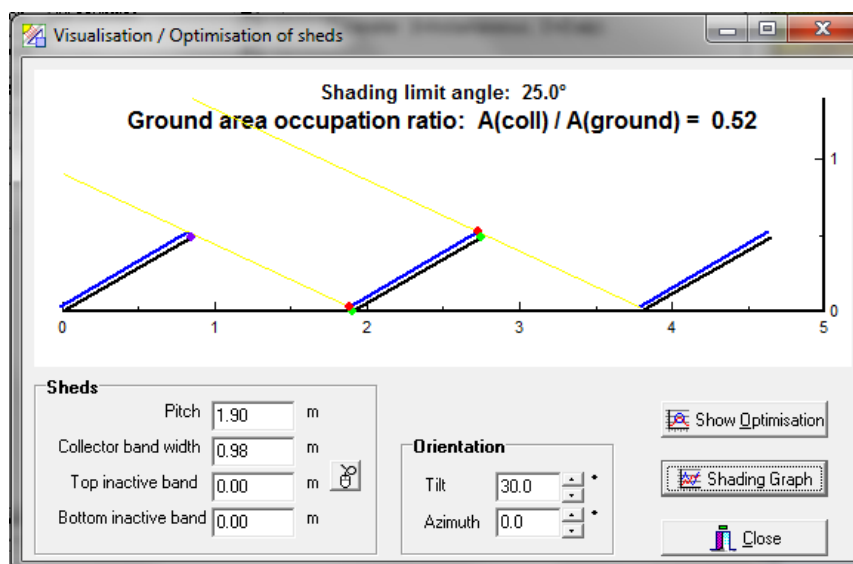


Figura 4.6: Interface “Shading/optimisation of sheds” para Lisboa solução Fluitecnik FTS 280P [28]

Após todas estas determinações colocam-se os módulos fotovoltaicos sem contabilização de espaçamentos ou peças de união, pois trata-se apenas da área sensível de módulo fotovoltaico e obtém-se assim um diagrama do factor de sombreamento ao longo de todo o ano (Figura 4.7). O aspecto final do edifício, colector solar térmico e módulos fotovoltaicos é o apresentado na figura 4.8.

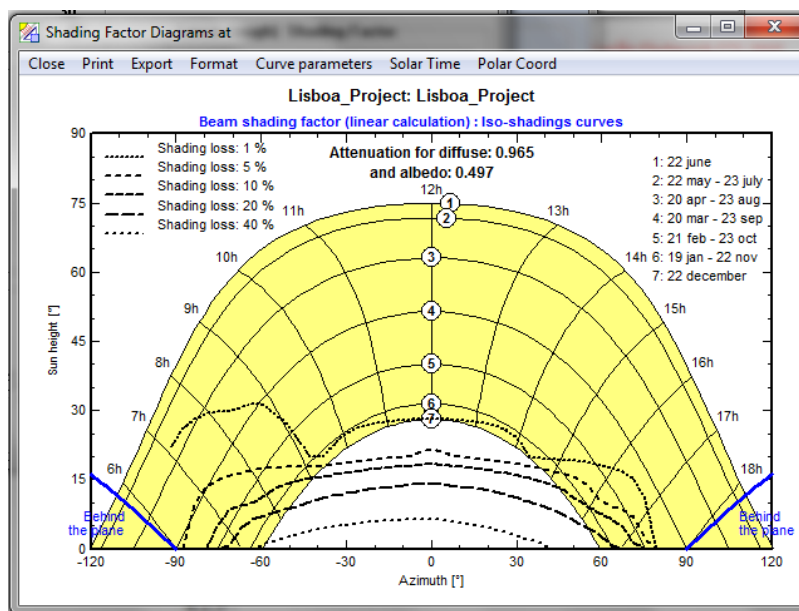


Figura 4.7: Diagrama do factor de sombreamento ao longo do ano [28]

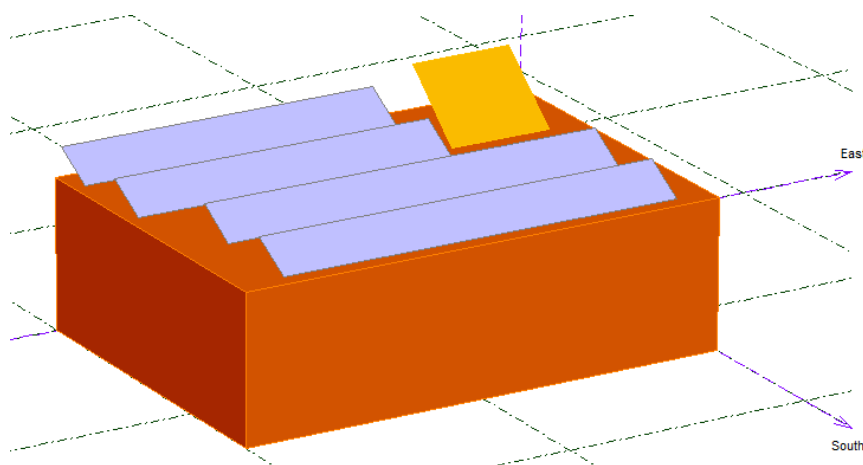


Figura 4.8: Esquema do edifício definido no programa PVsyst [28]

#### 4.2.1.5 - Caracterização dos componentes do sistema solar fotovoltaico

No campo “System” (Figura 4.11) são definidos os componentes constituintes do sistema fotovoltaico, ou seja, os módulos fotovoltaicos, o inversor e as ligações até à rede eléctrica. Como foi referido no início desta secção, o inversor vai ser o mesmo para as diferentes soluções de sistemas fotovoltaicos pelas razões indicadas.

Os módulos fotovoltaicos podem ser escolhidos da base de dados existente ou inseridos manualmente. Os módulos fotovoltaicos utilizados nesta dissertação são módulos comerciais de utilização frequente no mercado português. Os módulos fotovoltaicos que não se encontravam na base de dados foram

definidos com recurso às fichas técnicas dos mesmos. Apresenta-se no quadro 4.1 um resumo dos módulos fotovoltaicos utilizados divididos em função do tipo de célula.

Quadro 4.1: Resumo das tecnologias, fabricantes e modelos utilizados

<b>Tecnologia</b>	<b>Fabricante</b>	<b>Modelo</b>
<b>Silício Monocristalino (Mono-Si)</b>	Fluitemnik	FTS 250M
	Open Renewables	Open 250-ME60
	GooSun	GooSun 230M
	Yohkon Energia	YE6 220M-245
<b>Silício Policristalino (Poly-Si)</b>	Martifer Solar	MTS 230P
	Fluitemnik	FTS 280P
	Open Renewables	Open 245-PC60
	GooSun	GooSun 230P
	Yohkon Energia	YE6 220P-235
<b>Silício Amorfo (a-Si)</b>	Solar Plus	SP44

Seguidamente no quadro 4.2 apresentam-se os rendimentos dos módulos fotovoltaicos obtidos com base nas informações do fabricante para as condições STC, através da expressão 2.3. Como se pode observar a partir do quadro 4.2, os rendimentos dos módulos monocristalinos são ligeiramente superiores aos correspondentes aos módulos policristalinos, como seria de esperar.

Quadro 4.2: Valores de rendimentos dos módulos fotovoltaicos

<b>Tecnologia</b>	<b>Fabricante</b>	<b>Modelo</b>	<b>V<sub>mpp</sub> (V)</b>	<b>I<sub>mpp</sub> (A)</b>	<b>Área (m<sup>2</sup>)</b>	<b>η (%)</b>
<b>Silício Monocristalino (Mono-Si)</b>	Fluitemnik	FTS 250M	31,02	8,06	1,383	18,08
	Open Renewables	Open 250-ME60	31,25	8	1,383	18,08
	GooSun	GooSun 230M	28,8	8	1,46	15,78
	Yohkon Energia	YE6 220M-245	31,5	8,01	1,383	18,24
<b>Silício Policristalino (Poly-Si)</b>	Martifer Solar	MTS 230P	28,93	7,97	1,609	14,33
	Fluitemnik	FTS 280P	35,13	7,97	1,932	14,49
	Open Renewables	Open 245-PC60	30,2	8,11	1,64	14,93
	GooSun	GooSun 230P	30,1	7,67	1,46	15,81
	Yohkon Energia	YE6 220P-235	30,66	7,67	1,46	16,11
<b>Silício Amorfo (a-Si)</b>	Solar Plus	SP44	45	0,98	0,791	5,58

Do ponto de vista da configuração dos módulos fotovoltaicos, o PVsyst sugere configurações em série e paralelo, que podem ser modificadas tendo em conta os seguintes requisitos:

- a tensão mínima do arranjo fotovoltaico nas piores condições de temperatura (70°C) não deve ser inferior ao intervalo de tensões MPPT do inversor;
- a tensão máxima do arranjo fotovoltaico nas piores condições de temperatura (20°C) não deve ser superior ao intervalo de tensões MPPT do inversor;
- a tensão máxima de circuito aberto ( $V_{oc}$  a -10°C) não deve exceder a tensão máxima absoluta de entrada do inversor;
- a tensão máxima de circuito aberto ( $V_{oc}$  a -10°C) do conjunto de módulos não deve exceder a tensão específica definida pelo módulo fotovoltaico.

No caso do inversor escolhido (SunnyBoy SB3800 V) o intervalo de tensões de funcionamento MPPT é de [200-400] V e a tensão máxima de entrada no inversor é de 500V. Em anexo (ANEXO I) encontram-se os cálculos necessários para verificar as condições das configurações dos módulos fotovoltaicos.

Depois de se ter definida a configuração dos módulos fotovoltaicos foi necessário definir as perdas detalhadas. Neste passo não foram modificados muitos aspectos, apenas foi indicado que os módulos fotovoltaicos eram fixos com ventilação livre (Figura 4.9) e alteradas as perdas devidas aos cabos eléctricos no lado DC.

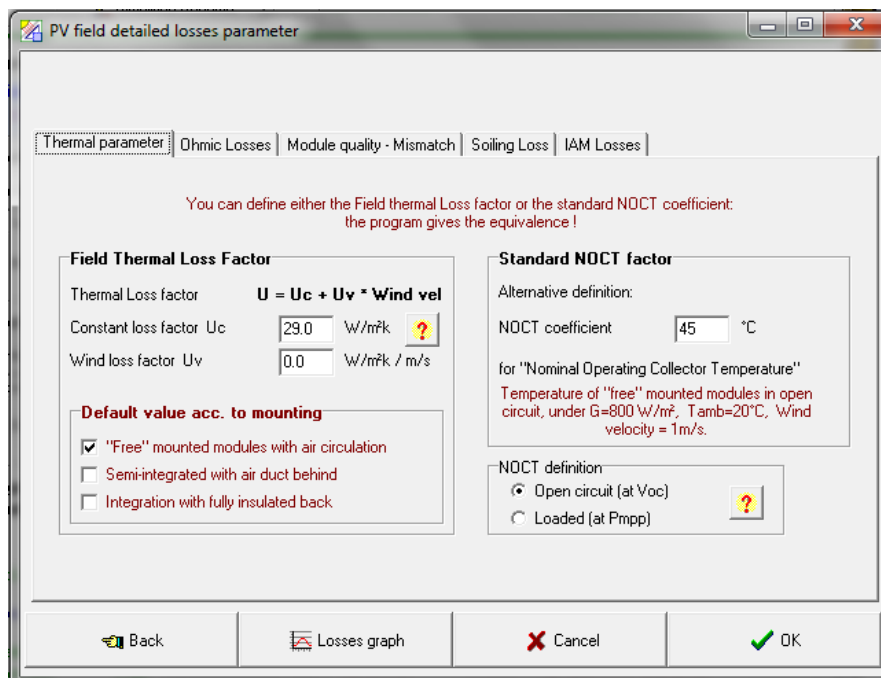


Figura 4.9: Janela de definição das perdas térmicas [28]

Os comprimentos e as secções dos cabos eléctricos dos módulos fotovoltaicos foram obtidos com base nas fichas técnicas dos respectivos módulos. Os comprimentos do cabo DC do quadro eléctrico DC

(“main box”) ao inversor foram obtidos considerando que este se encontra no interior da habitação ao lado do contador. A sua secção é considerada a mesma que a dos cabos dos módulos fotovoltaicos (nunca poderia ser menor). As perdas devido aos cabos do lado AC não são contabilizadas visto tratar-se de um edifício numa situação genérica foi considerado que o inversor é colocado junto ao contador de consumo (Figura 4.10).

Figura 4.10: Interface de definição dos comprimentos e secções dos cabos eléctricos [28]

Figura 4.11: Interface “System” [28]

---

#### 4.2.1.6 - Definição da disposição eléctrica dos módulos fotovoltaicos

Neste campo foi definida a disposição eléctrica dos módulos fotovoltaicos. O *layout* físico dos módulos fotovoltaicos já tinha sido definido no campo “*Construction/Perspective*”.

#### 4.2.2 - Simulação do sistema solar térmico

Apresenta-se de seguida o procedimento de simulação adoptado no programa SolTerm. Como se pode observar o diagrama da figura 4.12 identifica os passos fundamentais necessários para a realização duma simulação com o objectivo de averiguar a contribuição dos sistemas solares térmicos para o balanço energético dos edifícios residenciais unifamiliares.

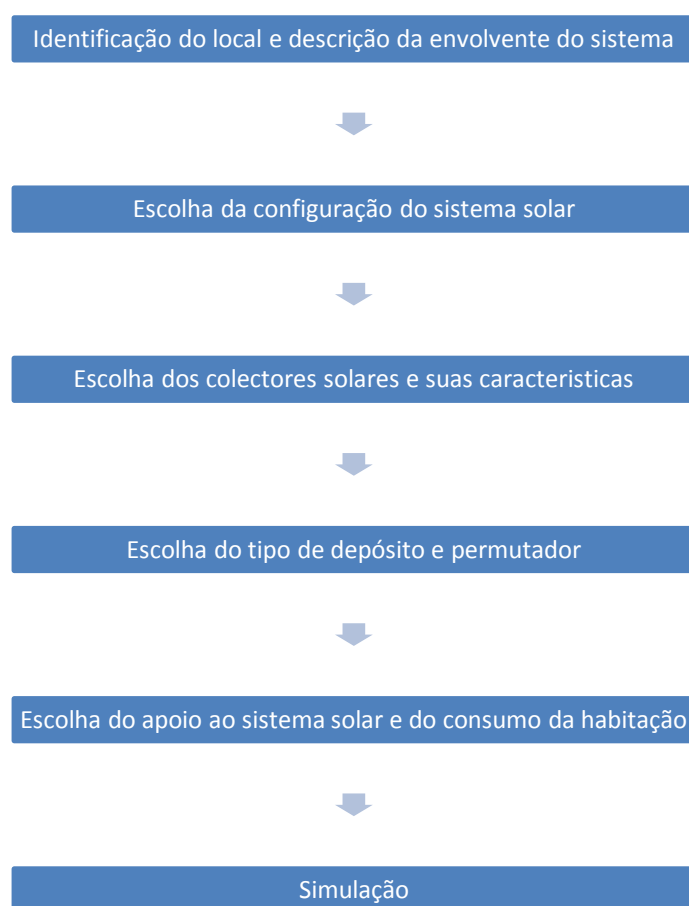


Figura 4.12: Modelo ilustrativo do processo de simulação de sistemas solares térmicos através do programa SolTerm

##### 4.2.2.1 - Identificação do local e descrição da envolvente do sistema

A definição da simulação começa com a escolha do local a simular e a definição dos detalhes associados ao mesmo. Nos detalhes do local não foram feitas alterações, ou seja, utilizaram-se os valores típicos tanto para a turbidez da atmosfera como para o albedo do solo e o horizonte é



considerado limpo (Figura 4.13). Fizeram-se estas escolhas visto o caso em estudo não ter uma localização definida podendo assim escolher-se a situação típica.

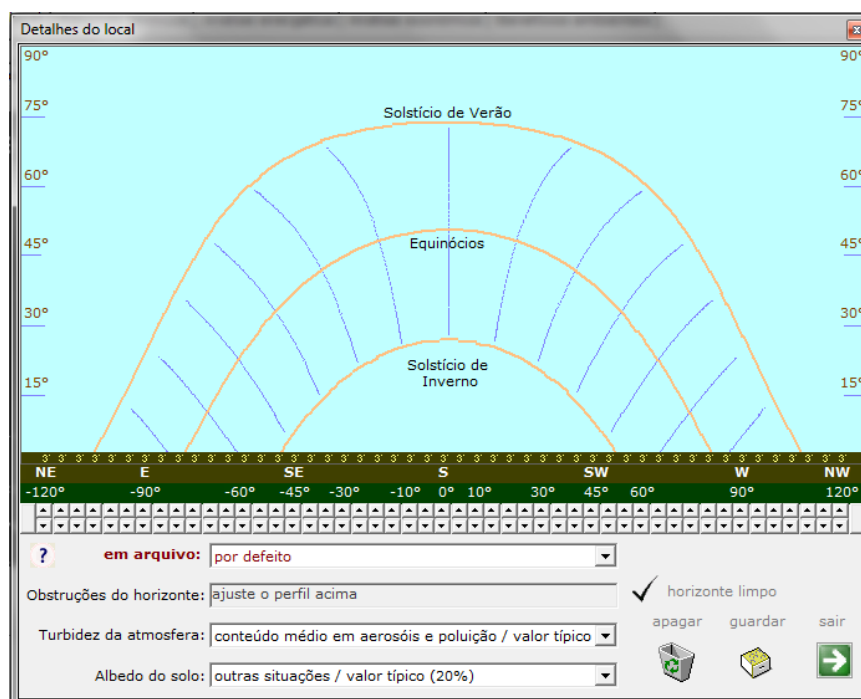


Figura 4.13: Janela de definição dos detalhes do local no SolTerm [3]

#### **4.2.2.2 - Definição dos componentes do sistema solar térmico**

Neste passo são definidos os colectores solares a utilizar, o depósito e todas as características tanto do circuito primário como do circuito secundário.

Optou-se por definir um sistema solar de circulação forçada (e não um do tipo termossifão) devido às seguintes razões:

- o facto de o depósito ser colocado no interior da habitação em vez de no exterior o que impossibilita a escolha de um sistema por termossifão;
- a escolha da utilização de um colector padrão em vez de um “kit doméstico”;
- o facto de o depósito não ser colocado na horizontal em cima dos colectores solares maximiza a incidência de radiação solar tanto sobre os colectores solares térmicos como sobre os módulos fotovoltaicos adjacentes e a estratificação no interior do depósito também é melhorada;
- o facto de se escolher o colector padrão e não a escolha de uma marca específica ficando assim o trabalho mais genérico;
- o depósito no interior do edifício melhora o seu funcionamento, minimizando as suas perdas térmicas.

Assim sendo, definiram-se os colectores solares como sendo do tipo “padrão” de acordo com o RCCTE, o qual indica uma área de 1m<sup>2</sup> de colector solar por ocupante. Uma vez tratar-se de uma habitação unifamiliar de tipologia T3 serão necessários 4m<sup>2</sup> de colector padrão. A inclinação adoptada para estes colectores solares foi de 40° com orientação a Sul (Azimute 0°) (Figura 4.14). A razão para a escolha deste azimute e inclinação é a mesma que para os módulos fotovoltaicos. No entanto, a inclinação adoptada é superior à dos módulos fotovoltaicos, pois neste caso teve-se em conta a optimização do funcionamento do colector para todas as estações, sem privilegiar a estação com maior potencial de aproveitamento da radiação solar. Essa inclinação é aproximadamente igual à latitude do local [4, 19, 22]. Como as latitudes dos locais em estudo rondam os 40° (Faro=37,04°; Évora=38,53°; Lisboa=38,73°; Porto=41,16°; Bragança=41,78°) optou-se pela utilização desta inclinação mantendo assim a coerência entre simulações.

Figura 4.14: Definição dos colectores solares no programa SolTerm [3]

O depósito escolhido foi um depósito em aço inox, colocado no interior da habitação, na vertical e com 200 litros de capacidade (Figura 4.15). Optou-se por um depósito colocado no interior da habitação e na vertical visto assim haver menores perdas térmicas e uma melhor estratificação no interior do mesmo.

A capacidade do depósito foi determinada com base no consumo médio diário de referência descrito no RCCTE que é obtido através da seguinte expressão [8]:

$$M_{AQS} = 40l \times \text{número de ocupantes} \quad (4.1)$$

$$M_{AQS} = 40 \times 4 = 160 \text{ litros}$$

Uma vez que para quatro ocupantes o RCCTE indica um consumo médio diário de referência de 160 litros, optou-se por um depósito de 200 litros, dando assim uma margem de segurança.

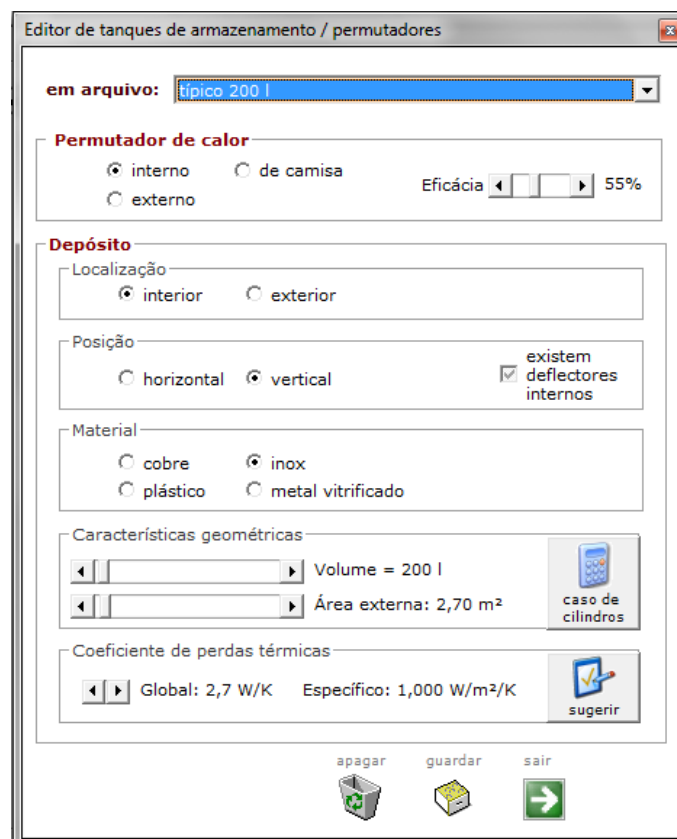


Figura 4.15: Editor de depósitos de armazenamento / permutadores do SolTerm [3]

As características de consumo utilizadas foram as mesmas tanto para dias úteis como para fins-de-semana, ou seja, um consumo regulamentar de águas quentes sanitárias (RCCTE) do tipo residencial para 4 ocupantes, ou seja, um consumo médio diário de referência igual a 40 litros por ocupante a uma temperatura de 60°C (Figura 4.16).

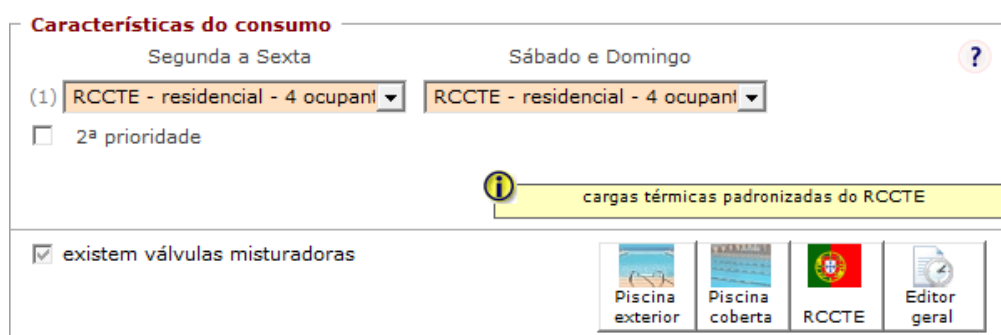


Figura 4.16: Características do consumo do SolTerm [3]

O tipo de apoio ao sistema solar utilizado vai ser eléctrico numa fase inicial e a gás natural numa fase posterior da apresentação dos resultados e conclusões. Em termos de tubagens do circuito primário e

---

do tipo de fluido circulante não foram feitas quaisquer alterações e foram utilizados os valores sugeridos pelo SolTerm com um comprimento de 10m, um diâmetro nominal de 25mm e um isolamento de 30mm em que 3m desse comprimento se encontra no exterior da habitação e os restantes 7m no interior da mesma. Em termos do fluido circulante utiliza-se uma fracção de mistura de 25% de anticongelante.

#### **4.2.2.3 - Análise energética**

Procedendo-se à análise energética obtêm-se diversos parâmetros como a quantidade de energia fornecida, o rendimento global, a fracção solar e a produtividade do sistema. O valor “Fornecido” é o valor a ter em conta no cálculo das necessidades de energia para preparação da água quente sanitária ( $E_{\text{solar}}$ ) através do RCCTE.

Ainda neste campo é possível caso o utilizador deseje proceder a uma optimização da orientação dos colectores, reduzir-se a energia fornecida pelo apoio ou aumentar-se a fracção solar.

### **4.3- Apresentação e discussão de resultados**

Apresentam-se de seguida os resultados obtidos na sequência das simulações realizadas para averiguar a contribuição dos sistemas solares térmicos e fotovoltaicos para o balanço energético dos edifícios residenciais unifamiliares. Numa primeira fase vão ser determinadas as necessidades nominais de energia sem que seja considerado o contributo do colector solar térmico. Numa fase posterior são apresentados os resultados do sistema solar fotovoltaico e térmico e por fim são determinados os valores de necessidades nominais de energia desta vez tendo em consideração a energia produzida pelo colector solar térmico.

#### **4.3.1 - Necessidades nominais de energia**

Inicialmente foram determinados os valores limite das necessidades nominais de energia útil para aquecimento ( $N_i$ ), arrefecimento ( $N_v$ ) e para preparação das AQS ( $N_a$ ). Estes valores foram obtidos através de expressões e tabelas existentes no RCCTE. Os valores das necessidades são necessários para efeitos de análise comparativa produção versus necessidades. Para se testar o pior cenário possível, os valores das necessidades utilizados nesta análise comparativa correspondem aos limites regulamentares.

De acordo com o RCCTE, os valores limite das necessidades de energia útil para aquecimento de uma fracção autónoma dependem do factor de forma ( $FF_{\text{RCCTE}}$ ) da fracção autónoma e dos graus-dia (GD) do concelho em questão,

$$FF_{RCCTE} = \frac{(\sum A_{ext}) + \sum_i(\tau \times A_{int})}{V} (m^2/m^3) \quad (4.2)$$

$$FF_{RCCTE} = \frac{((10 \times 3 + 7 \times 3) \times 2 + 7 \times 10)}{10 \times 7 \times 3} = 0.819048 \approx 0.8 m^2/m^3$$

Onde,

$\Sigma A_{ext}$  é o somatório das áreas da envolvente exterior;

$\Sigma A_{int}$  é o somatório das áreas da envolvente interior;

$\tau$  é o coeficiente que relaciona a área dos elementos que separam o espaço útil interior do espaço não útil com o a área dos elementos que separam o espaço não útil do ambiente exterior.

Como,

$$0.5 < FF_{RCCTE} \leq 1 \quad \Rightarrow \quad N_i = 4.5 + (0.021 + 0.037 \times FF_{RCCTE}) \times GD \quad (4.3)$$

Os valores de GD são obtidos com base no Quadro III.1 do RCCTE e obtém-se:

Quadro 4.3: Valor do número de graus-dia e das necessidades nominais de energia útil para aquecimento [8]

Local	Número de graus-dia (GD) (°C.dias)	N <sub>i</sub> (kWh/m <sup>2</sup> .ano)
<b>Bragança</b>	2850	150,72
<b>Porto</b>	1610	87,10
<b>Évora</b>	1390	75,81
<b>Lisboa</b>	1190	65,55
<b>Faro</b>	1060	58,88

Com base no RCCTE, as necessidades de energia para preparação de AQS (N<sub>a</sub>) são obtidas com base na expressão seguinte:

$$N_a = \frac{0,081 \times M_{AQS} \times n_d}{A_p} (kWh/m^2 . ano) \quad (4.4)$$

onde,

$n_d$  é o número anual de dias de consumo de AQS (dias) (Tabela VI.2 do RCCTE);

$M_{AQS}$  é o consumo médio diário de referência de AQS (litros);

$A_p$  é a área de pavimento (m<sup>2</sup>).

$$N_a = \frac{0,081 \times 160 \times 365}{70} = 67,58 kWh/m^2 . ano$$

Uma vez que não depende de nenhum factor do local, o valor de  $N_a$  vai ser igual para todos os locais. Os valores das necessidades nominais de energia útil para arrefecimento são tabelados dependendo apenas da zona climática de verão do local. As zonas climáticas são obtidas através do RCCTE e são apresentadas no quadro 4.4.

Quadro 4.4: Zonas climáticas e valores das necessidades nominais de energia útil para arrefecimento [8]

Local	Zonas Climáticas		$N_v$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)
	Inverno	Verão	
<b>Bragança</b>	I3	V2 norte	18
<b>Porto</b>	I2	V1 norte	16
<b>Évora</b>	I1	V3 sul	32
<b>Lisboa</b>	I1	V2 sul	32
<b>Faro</b>	I1	V2 sul	32

Uma vez calculadas todas as necessidades de energia útil para aquecimento, arrefecimento e preparação de AQS, pode-se então calcular a necessidade total de energia final com recurso à expressão seguinte:

$$N_t = \frac{N_i}{\eta_i} + \frac{N_v}{\eta_v} + N_a \text{ (kWh/m}^2 \text{ . ano)} \quad (4.5)$$

onde,

$\eta_i$  é a eficiência nominal dos equipamentos utilizados para os sistemas de aquecimento;

$\eta_v$  é a eficiência nominal dos equipamentos utilizados para os sistemas de arrefecimento.

Seguidamente serão apresentadas as necessidades totais de energia final, estas necessidades serão apresentadas em duas variáveis diferentes o  $N_{t1}$  e o  $N_{t2}$ . Mostrou-se necessário fazer esta diferenciação, pois existem dois tipos de necessidades totais de energia final pelo facto de inicialmente estas necessidades terem sido calculadas sem consideração da energia produzida pelo colector solar e numa segunda fase esta energia já ser considerada. Foi feita estas duas comparações para simular tanto a situação em que não é instalado um sistema solar térmico como a situação em que este é instalado.  $N_{t1}$  e  $N_{t2}$  correspondem respectivamente à situação inicial em que não é contabilizada a produção de energia por parte do colector solar e à situação em que esta energia é contabilizada.

Para o cálculo das necessidades de energia final total é necessário que as necessidades nominais de energia útil de aquecimento e arrefecimento sejam afectadas pela eficiência nominal dos equipamentos, ou seja, o número de kWh de energia de aquecimento ou arrefecimento produzida a partir de 1kWh de energia final. No caso em estudo foi considerado que será utilizada uma bomba de calor tanto para aquecimento como para arrefecimento. Os valores de eficiência da bomba de calor são de 4 para aquecimento e de 3 para arrefecimento [8]. Assim sendo obtêm-se os valores de energia final total apresentados no quadro 4.5.

Quadro 4.5: Valores de necessidades de energia final total

Local	$N_{tf}^{1)} \text{ (kWh/m}^2\text{.ano)}$
<b>Bragança</b>	111,26
<b>Évora</b>	97,20
<b>Faro</b>	92,96
<b>Lisboa</b>	94,63
<b>Porto</b>	94,69

<sup>1)</sup>necessidades totais de energia final sem contabilização da energia produzida pelo colector solar

As necessidades globais anuais nominais específicas de energia primária são obtidas através da expressão seguinte,

$$N_{tp} = \frac{N_i}{\eta_i} \times F_{pui} + \frac{N_v}{\eta_v} \times F_{puv} + N_a \times F_{pua} \text{ (kWh/m}^2 \text{ . ano)} \quad (4.6)$$

onde os factores  $F_{pui}$ ,  $F_{puv}$  e  $F_{pua}$  são factores de conversão de energia final em energia primária. Estes factores de conversão tomam valores diferentes consoante a fonte de energia utilizada, ou seja, caso se trate de electricidade ou de combustíveis sólidos, líquidos e gasosos. Os factores utilizados são os seguintes [6, 21, 33]:

- a. electricidade:  $F_{pu}=3,31 \text{ kWh}_{\text{primária}}/\text{kWh}_{\text{final}}$ ;
- b. gás natural:  $F_{pu}=1,36 \text{ kWh}_{\text{primária}}/\text{kWh}_{\text{final}}$ .

De seguida vão ser apresentados os resultados das necessidades globais anuais nominais específicas de energia primária. Estas necessidades foram divididas em quatro tipos de necessidades diferentes,  $N_{tp1}$ ,  $N_{tp2}$ ,  $N_{tp3}$  e  $N_{tp4}$  que diferem entre si no tipo de fonte de energia utilizada para a preparação de AQS e na contabilização ou não da energia produzida pelo colector solar. Estes diferentes tipos de valores de necessidades foram necessário para a perfeita comparação de todas as situações possíveis e sua posterior comparação com os valores de produção fotovoltaica.

Os valores das necessidades globais anuais nominais específicas de energia primária obtidas são as apresentadas no quadro seguinte.

Quadro 4.6: Necessidades globais nominais específicas de energia primária

Local	$N_{tp1}^{1)}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	$N_{tp2}^{2)}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)
<b>Bragança</b>	368,26	236,48
<b>Évora</b>	321,72	189,95
<b>Faro</b>	307,71	175,94
<b>Lisboa</b>	313,23	181,46
<b>Porto</b>	313,41	181,63

<sup>1)</sup>necessidades globais nominais de energia primária com preparação de AQS com uso de electricidade sem contabilização da energia produzida pelo colector solar

<sup>2)</sup> necessidades globais nominais de energia primária com preparação de AQS com uso de gás natural sem contabilização da energia produzida pelo colector solar

Os valores apresentados no quadro anterior dizem respeito às necessidades globais nominais específicas de energia primária sem contabilização da energia produzida pelo colector solar e no caso dos primeiros valores ( $N_{tp1}$ ) considerando o uso de electricidade para aquecimento, arrefecimento e produção de AQS. Os segundos valores de necessidades de energia final total ( $N_{tp2}$ ) diferem dos primeiros ( $N_{tp1}$ ) pois consideram a utilização de gás natural para a preparação de AQS.

#### 4.3.2 - Simulação do sistema solar fotovoltaico

Como foi referido anteriormente na secção 4.2.1 desta dissertação, foram efectuadas diversas simulações para diferentes tecnologias (silício monocristalino, silício policristalino, silício amorfo) e para diferentes fabricantes para cada tecnologia.

Dos 70 m<sup>2</sup> de área de cobertura disponível apenas se encontravam disponíveis 62 m<sup>2</sup> para a colocação de módulos fotovoltaicos devido ao sistema solar térmico. Estes módulos foram dispostos como apresentado na figura 4.17, onde a área a verde foi destinada à colocação do colector solar térmico e a azul estão representados os módulos fotovoltaicos.



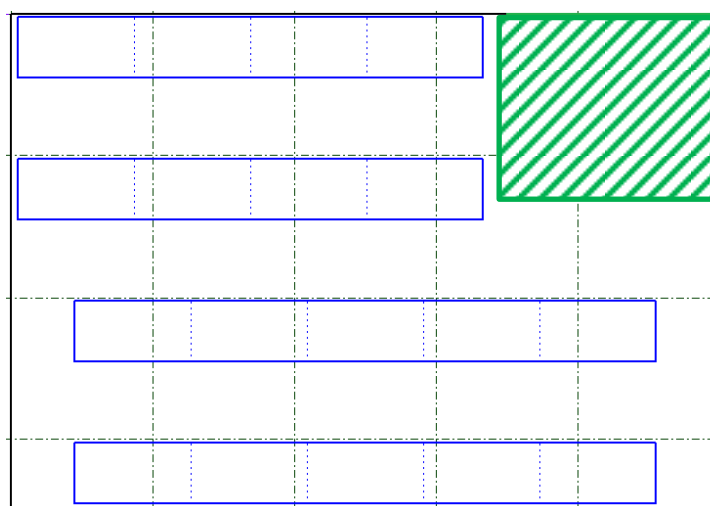


Figura 4.17: Exemplo das áreas disponíveis para a colocação dos módulos fotovoltaicos e do coletor solar térmico (adaptado de [28])

Assim sendo, para soluções de módulos fotovoltaicos de silício monocristalino e de silício policristalino obtiveram-se os seguintes valores de produção anual apresentados nas figuras 4.18 e 4.19 respectivamente.

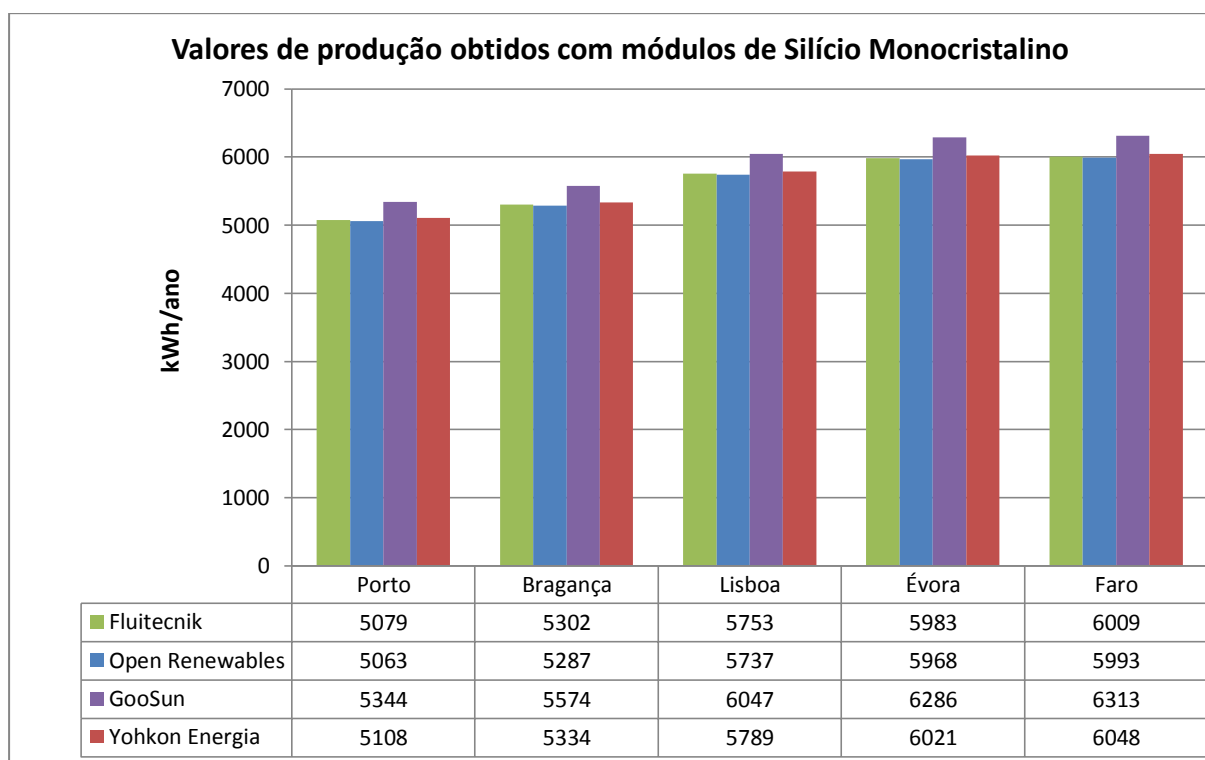


Figura 4.18: Valores de produção anual com módulos fotovoltaicos de silício monocristalino

Da análise da figura 4.18 observa-se que em termos de produção total anual o modelo da GooSun é o que apresenta melhores valores para qualquer localidade.

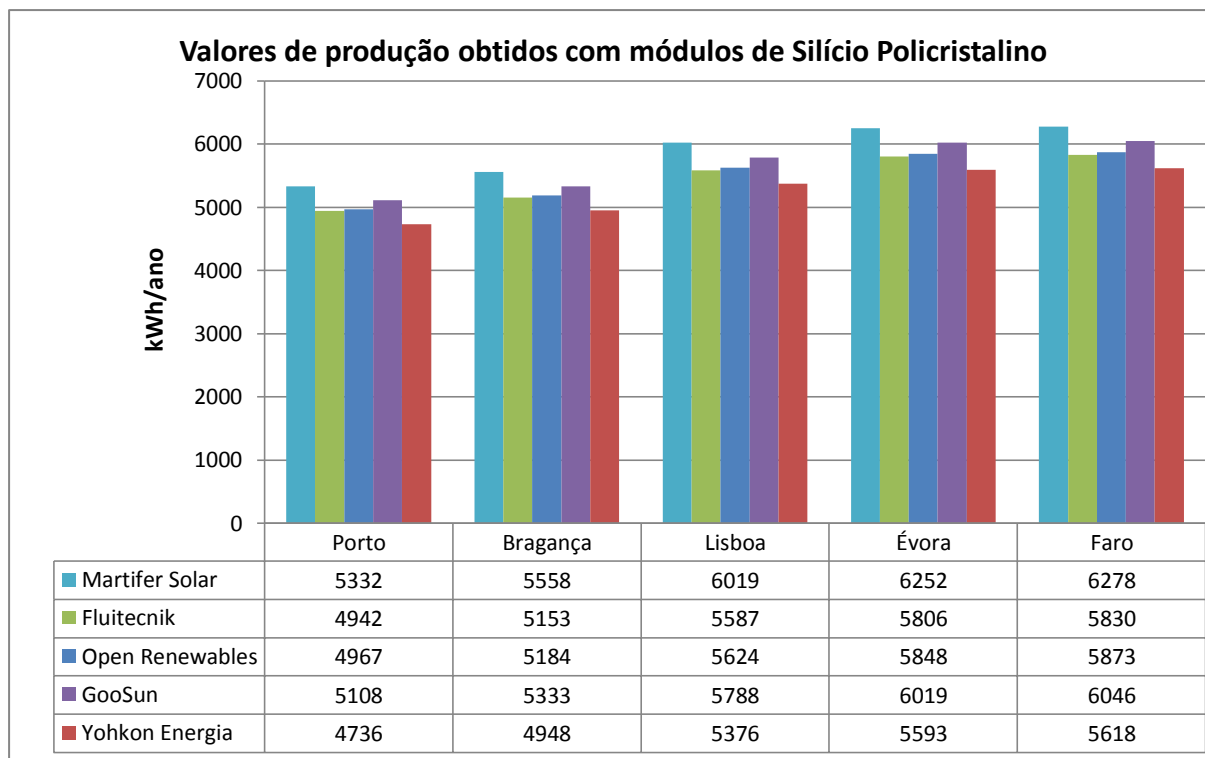


Figura 4.19: Valores de produção anual com módulos fotovoltaicos de silício policristalino

De observar que no caso da utilização de módulos fotovoltaicos de silício policristalino o fabricante que possui melhores valores de produção anual é o da Martifer Solar. Contudo os módulos de silício monocristalino mostram um melhor rendimento relativamente aos de silício policristalino. Tal seria de esperar pois os módulos desta tecnologia apresentam melhores resultados de eficiência em condições STC. Apesar disto não basta a comparação de produção anual para averiguar se um módulo é melhor que outro, é necessário fazer comparações por kWp instalado, por m<sup>2</sup> de módulo, por m<sup>2</sup> de pavimento e por rácios de desempenho.

Foi efectuada também a simulação com utilização de módulos fotovoltaicos de silício amorfo. Os resultados obtidos são os apresentados no quadro seguinte, no entanto esta tecnologia mostrou-se pouco eficaz e insuficiente para alcançar os 3,68kWp desejados para a área disponível na cobertura.

Quadro 4.7: Valores de produção anual com módulos fotovoltaicos de silício amorfo

Fabricante	Modelo	Local	E <sub>AC</sub> (Produção total anual) (kWh/ano)
Solar Plus	SP44	Lisboa	2182

Uma vez que só estavam disponíveis 62m<sup>2</sup> de cobertura para a instalação de módulos fotovoltaicos não foi possível chegar à potência desejada, pois uma solução comercial apresentada pelo fabricante

da Solar Plus para a potência de 3,68kWp é constituída por 80 módulos de SP46. Nesta solução simulada apenas foi possível instalar 36 módulos SP44.

Assim sendo torna-se impraticável esta solução para a área disponível e para a potência desejada. Por esta razão não foram executadas mais simulações para outras localidades ou outros fabricantes desta mesma tecnologia.

Nas figuras 4.20 e 4.21 são apresentados os valores de produção com módulos fotovoltaicos monocristalinos e policristalinos relacionados com a potência nominal instalada em cada situação. Estes valores são os mais usualmente utilizados para a comparação entre módulos da mesma tecnologia bem como entre módulos de tecnologias diferentes.

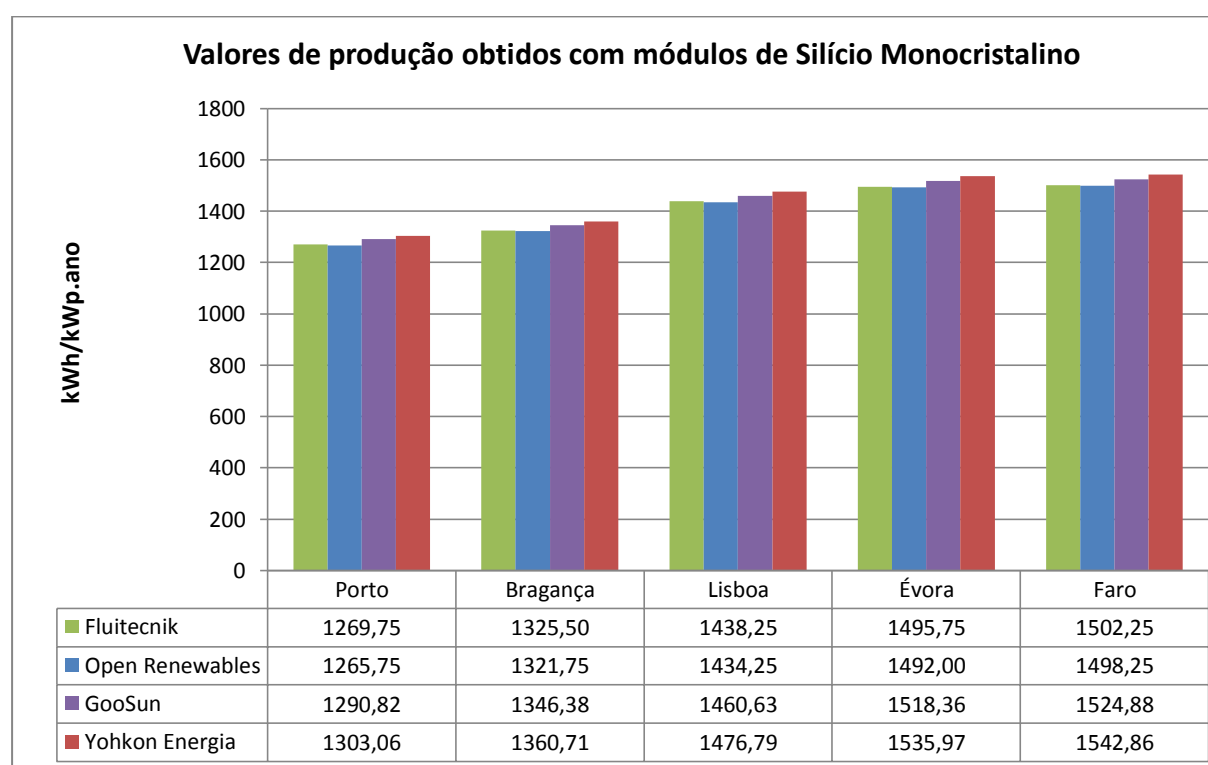


Figura 4.20: Valores de produção anual por potência nominal com módulos fotovoltaicos de silício monocristalino

Para além de se observar como nas figuras anteriores que Faro e Évora possuem as melhores condições para a produção de electricidade com recurso a módulos fotovoltaicos, observa-se também que fazendo uma relação produção/potência nominal há a alteração do fabricante com melhor desempenho, ou seja, neste caso o módulo fotovoltaico com melhor desempenho em todas as localidades é o produzido pela Yohkon Energia.

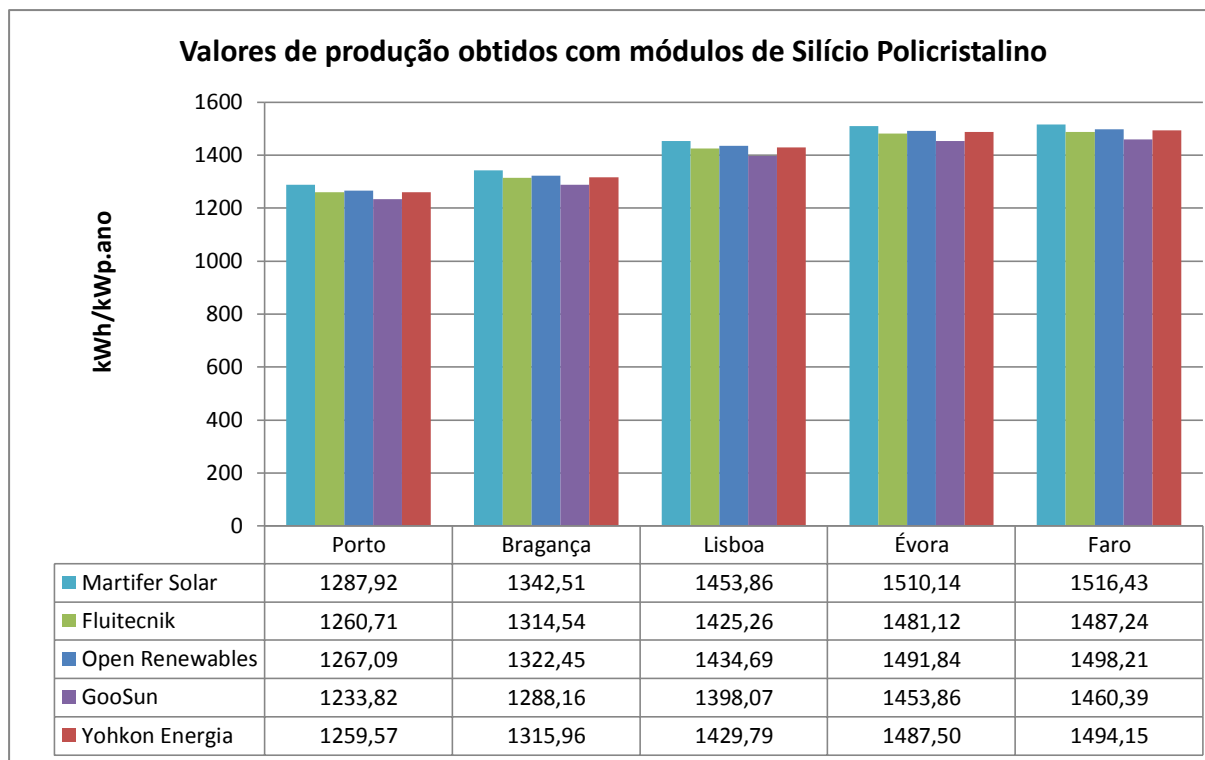


Figura 4.21: Valores de produção anual por potência nominal com módulos fotovoltaicos de silício policristalino

Com base na figura anterior, mais uma vez se verifica que Faro e Évora são as melhores localidades para a aplicação desta tecnologia. Observa-se que o módulo fotovoltaico produzido pela Martifer Solar continua a mostrar-se o mais eficiente.

Seguidamente vão ser apresentados os valores de produção eléctrica numa relação produção/m<sup>2</sup> de módulo fotovoltaico. Nas figuras 4.22 e 4.23 estão apresentados esses valores para soluções com módulos monocristalinos e policristalinos respectivamente.

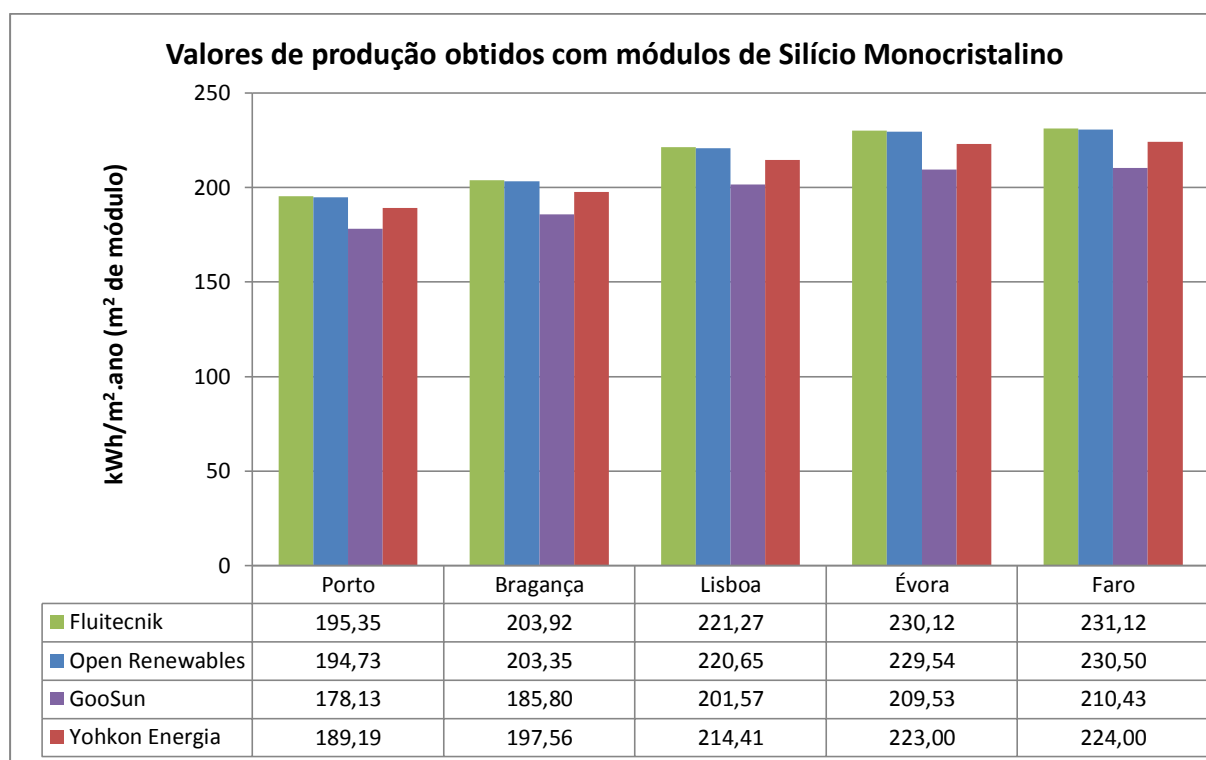


Figura 4.22: Valores de produção anual por metro quadrado de módulo para a tecnologia de silício monocristalino

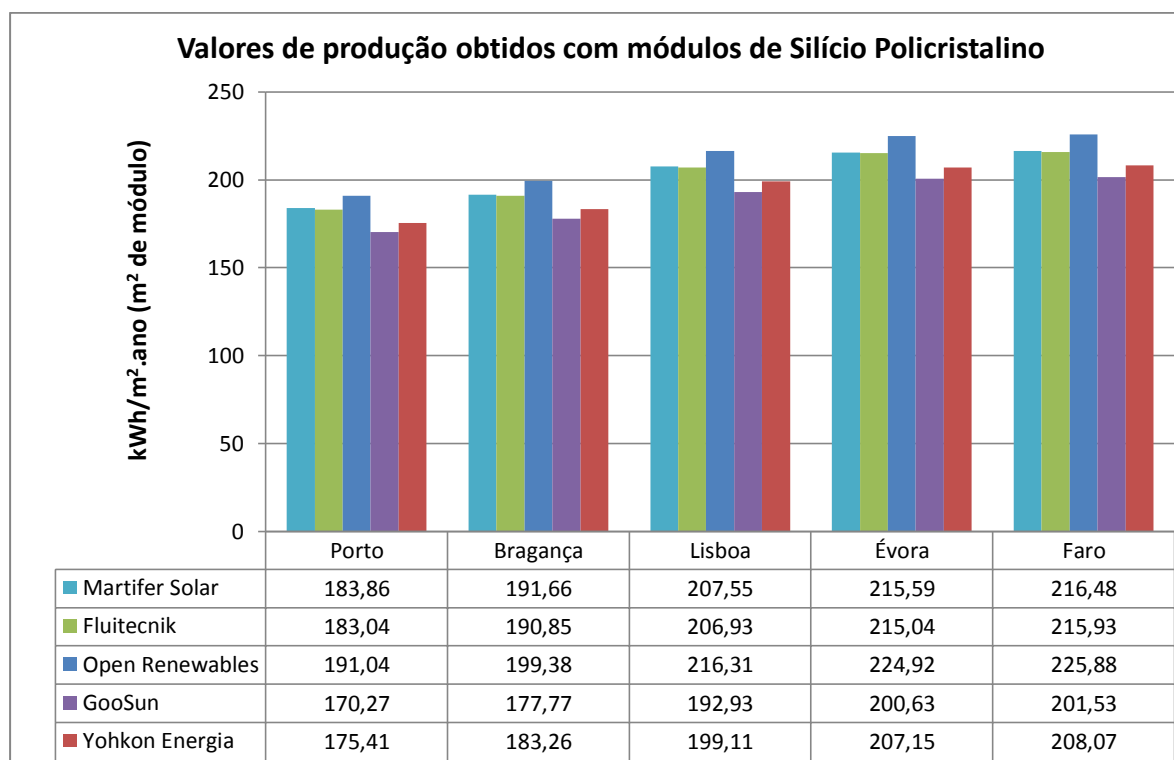


Figura 4.23: Valores de produção anual por metro quadrado de módulo para a tecnologia de silício policristalino

Com base nas figuras 4.22 e 4.23 foi possível concluir que os módulos compostos por células monocristalinas que apresentam melhor produção por  $\text{m}^2$  de módulo, são os módulos da Fluitecnik, e no caso de módulos compostos por células policristalina são os módulos da Open Renewables. Poderiam ser escolhidos qualquer um dos módulos anteriores quando a área disponível para a colocação do sistema fosse menor.

Tanto nos sistemas monocristalinos como nos policristalinos os módulos com melhores valores são aqueles que apresentam melhor produção por metro quadrado de módulo.

Em todas as figuras anteriores foi possível verificar que as soluções de módulos monocristalinos apresentam melhores valores de produção de energia eléctrica quando comparados com os módulos policristalinos.

Nas figuras 4.24 e 4.25 são apresentados os valores de produção com módulos fotovoltaicos monocristalinos e policristalinos por metro quadrado de pavimento em cada situação. Uma vez que os diferentes sistemas são aplicados sempre no mesmo edifício, ou seja, a mesma área de pavimento, estes valores não reflectem nada mais que a solução com maior produção anual. Uma vez que os valores presentes nestas figuras serão utilizados em comparações efectuadas mais adiante nesta dissertação torna-se necessária a sua apresentação.

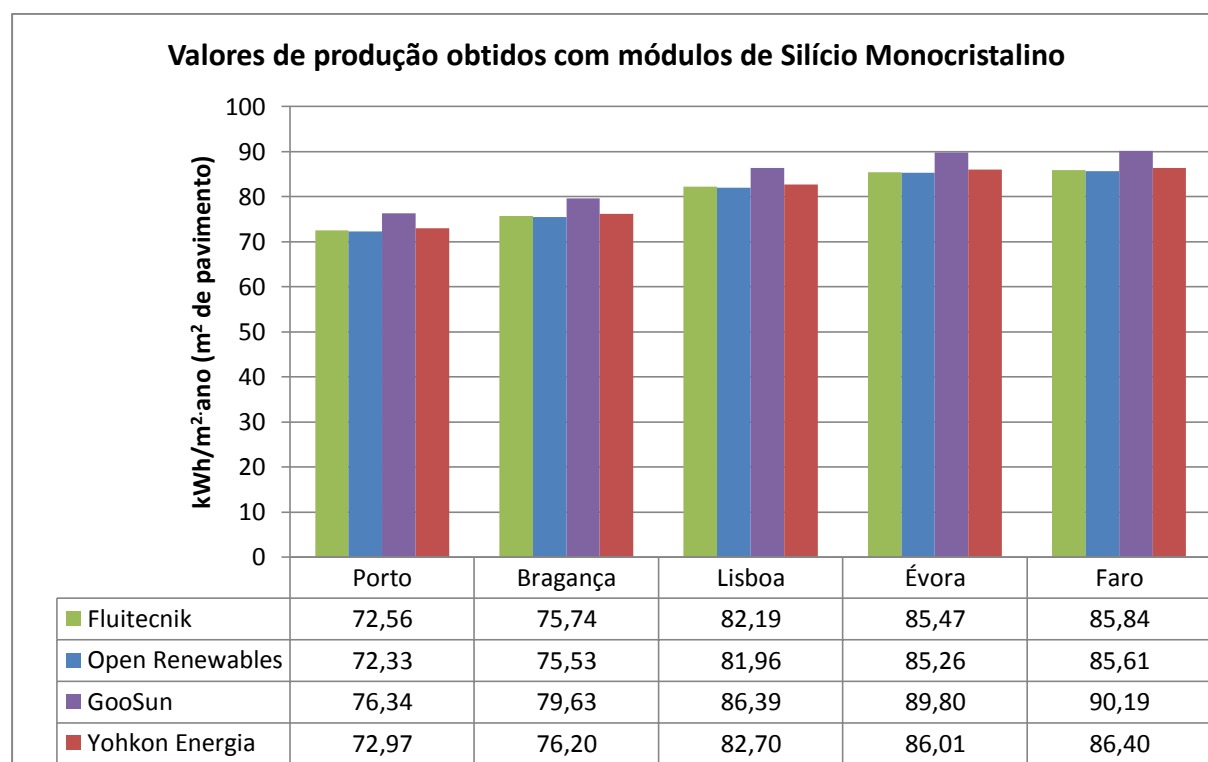


Figura 4.24: Valores de produção anual por metro quadrado de pavimento com módulos fotovoltaicos de silício monocristalino

Através da figura 4.24 observa-se que, como seria de esperar, o sistema fotovoltaico que apresenta maiores valores é o do fabricante da GooSun.

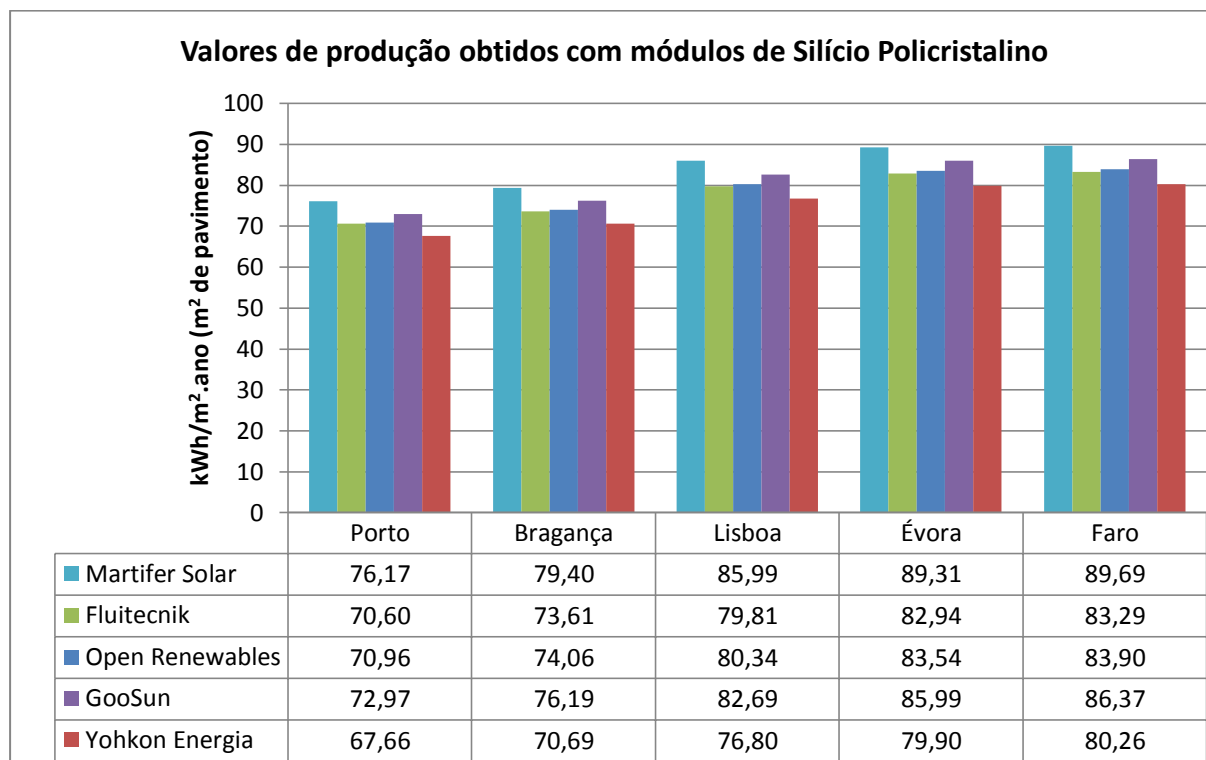


Figura 4.25: Valores de produção anual por metro quadrado de pavimento com módulos fotovoltaicos de silício policristalino

Com base na figura 4.25 observa-se que o sistema com maiores valores de produção anual é o sistema da Martifer Solar, como já tinha sido observado na figura 4.19. Tanto com sistemas fotovoltaicos monocristalinos como com sistemas fotovoltaicos policristalinos observa-se que os valores de produção aumentam de Porto para Faro, ou seja, de Norte para Sul. Uma exceção a essa regra verifica-se em Bragança que se encontra mais a norte que o Porto mas no entanto tem uma produção anual superior. A razão para tal acontecimento, deve-se ao facto de em Bragança haver uma maior irradiação global anual quando comparada com a do Porto.

Nas figuras 4.26 e 4.27 apresentam-se os valores do rácio de desempenho (*Performance Ratio* – PR) de todos os sistemas fotovoltaicos simulados para todas as localidades com excepção do módulo da tecnologia de silício amorfo. O rácio de desempenho é a eficiência global do sistema tendo em conta a potência nominal instalada. Este rácio tem em conta as perdas do arranjo fotovoltaico (sombreamentos, conversão fotovoltaica, etc.) e do sistema (eficiência do inversor, etc.) e como não é dependente de ficheiros climáticos ou de inclinações dos planos serve de comparação entre sistemas fotovoltaicos em diferentes localizações e orientações.

O rácio de desempenho é então obtido através da seguinte expressão [20, 39]:

$$PR = \frac{Y_f}{Y_r} \quad (4.7)$$

onde,

$$Y_r = \frac{H_i}{G_{ref}} (h) \quad (4.8)$$

$Y_r$  representa a energia de referência incidente no plano do colector (h);

$H_i$  representa a irradiação anual incidente no plano do módulo ( $\text{kWh/m}^2$ );

$G_{ref}$  representa a irradiância em condições STC ( $\text{W/m}^2$ ).

$$Y_f = \frac{E_{AC}}{P_{nom}} (h) \quad (4.9)$$

$Y_f$  representa a energia normalizada produzida pelo sistema (h);

$E_{AC}$  representa o total de energia entregue à rede eléctrica (kWh);

$P_{nom}$  representa a potência nominal do sistema instalado (kWp).

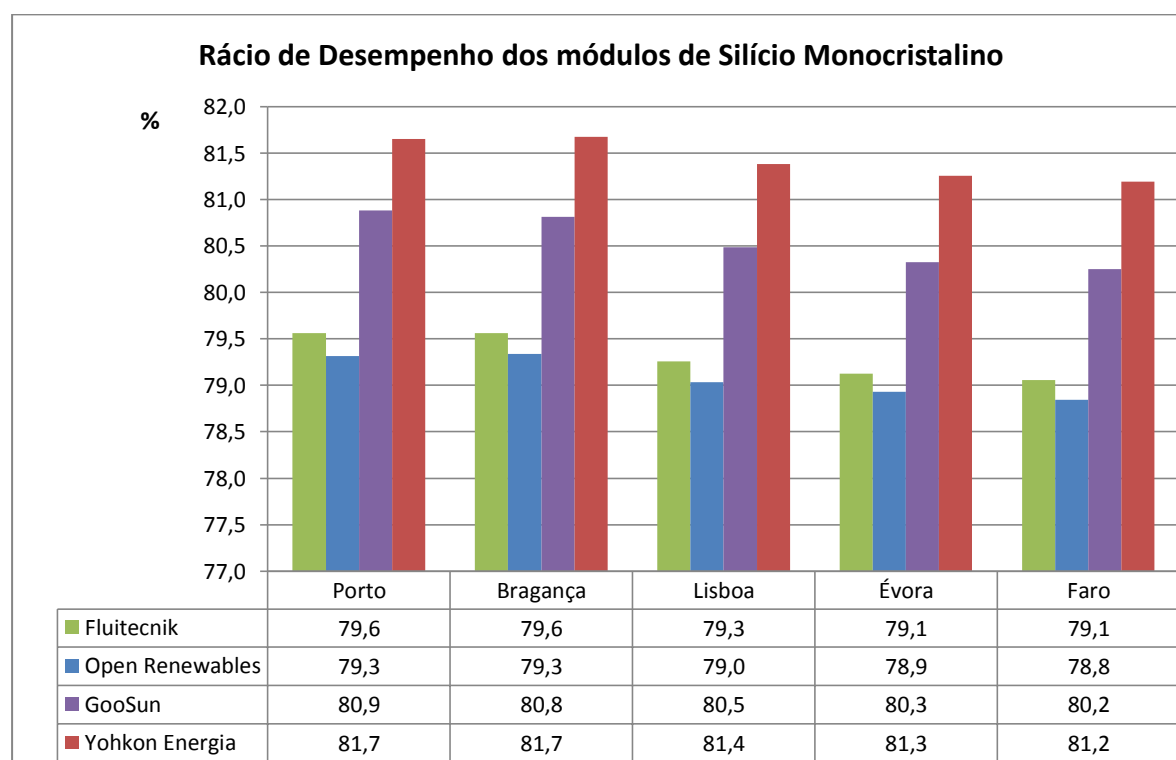


Figura 4.26: Rácio de desempenho dos módulos de silício monocristalino



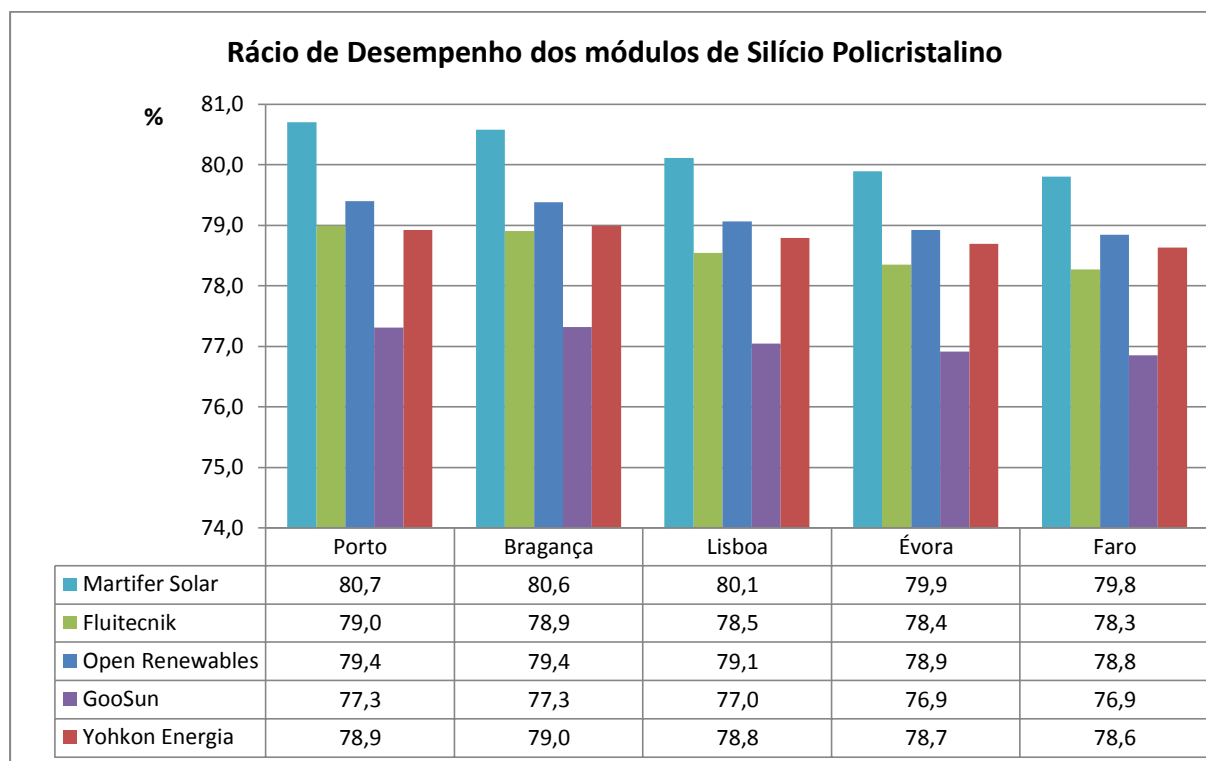


Figura 4.27: Rácio de desempenho dos módulos de silício policristalino

Com recurso às figuras anteriores (figura 4.26 e figura 4.27) é possível observar que as localidades com melhor rácio de desempenho são as localidades de Porto e Bragança tanto para módulos de silício monocristalino como para módulos de silício policristalino. De observar que estas localidades em termos de produção total anual de electricidade são as que apresentam menores valores.

Para a compreensão deste factor é necessário observar os quadros II.1 e II.2 presentes no anexo II referentes às perdas dos diferentes sistemas monocristalinos e policristalinos, respectivamente. Nestes quadros apenas constam as perdas referentes a Faro e Porto por estas se tratarem dos extremos de produção das localidades simuladas. Assim sendo e com base nos quadros de perdas pode observar-se que as principais diferenças entre Faro e Porto se verificam nas perdas devido à temperatura, mostra que apesar de Faro ter uma maior irradiância anual isso resulta em maiores perdas devido à temperatura de funcionamento do sistema ser mais elevada. Pode-se então concluir que em termos de desempenho do sistema, este é melhor nas localidades do Porto ou Bragança, significando que apesar do sistema receber menos radiação este produz mais devido à inferior temperatura de funcionamento. Mostrando assim que a elevada temperatura do sistema solar fotovoltaico leva a que ocorram mais perdas e que o sistema não seja tão eficiente.

Contudo, uma vez que para esta dissertação o factor mais importante é o valor de produção total anual, a escolha do sistema para efeitos de alcance de performance *nZEB* vai depender dos valores referentes à produção anual.

### 4.3.3 - Simulação do sistema solar térmico

Nesta secção são apresentados os resultados obtidos de produção de energia solar térmica através das simulações executadas com base no programa SolTerm. Foram utilizados quatro colectores do tipo “padrão” segundo o RCCTE de 1m<sup>2</sup> para as diferentes localizações e os resultados obtidos são os apresentados no quadro 4.8.

Quadro 4.8: Valores obtidos através da simulação no programa SolTerm de quatro colectores do tipo “padrão”

Local	Fornecido (E <sub>Solar</sub> ) (kWh/ano)	Carga (kWh/ano)	Apoio (kWh/ano)	Fracção Solar (%)	Rend. Global Anual	Produtividade (kWh/[m <sup>2</sup> colector])
Lisboa	1929	3056	1127	63,1	26%	482
Faro	2022	3056	1034	66,2	26%	506
Bragança	1753	3056	1303	57,4	25%	438
Porto	1641	3056	1415	53,7	25%	410
Évora	2015	3056	1040	65,9	26%	504

Com estes resultados e tendo em conta que o apoio considerado nesta situação é a electricidade foi possível proceder ao cálculo das necessidades de energia para preparação de águas quentes sanitárias através da expressão:

$$N_{ac} = \frac{Q_a/\eta_a - E_{solar}}{A_p} \text{ (kWh/m}^2\text{.ano)} \quad (4.10)$$

onde,

Q<sub>a</sub> é a energia útil despendida com sistemas convencionais de preparação de AQS (kWh/ano);

η<sub>a</sub> é a eficiência de conversão dos sistemas de preparação de AQS a partir de uma fonte primária de energia (segundo o RCCTE para a situação indicada utiliza-se um valor igual a 0,9 por se tratar de apoio a electricidade, caso seja utilizado apoio a gás natural este valor será alterado para 0,5);

E<sub>solar</sub> é a contribuição de sistemas de colectores solares para o aquecimento de AQS (kWh/ano).

Para o cálculo de “Q<sub>a</sub>” é utilizada a expressão existente no RCCTE:

$$Q_a = \frac{M_{AQS} \times 4187 \times \Delta T \times n_d}{3600000} \text{ (kWh/ano)} \quad (4.11)$$

onde,

$\Delta T$  é o aumento de temperatura necessário para preparar as AQS ( $\Delta T=45^{\circ}\text{C}$ ).

Logo, com base nestas expressões obtêm-se os valores de necessidades de energia para preparação de AQS apresentados no quadro 4.9.

De seguida vão ser apresentados os valores de necessidades de energia para a preparação de AQS, tendo em conta os valores de produção de energia por parte do colector solar. Houve a necessidade da criação de duas necessidades diferentes ( $N_{ac1}$  e  $N_{ac2}$ ) para que fossem averiguadas todas as situações possíveis, ou seja, neste caso em concreto estas duas variáveis diferem no tipo de fonte de energia utilizado como apoio para a preparação de AQS.

Os dois tipos de energia para preparação para preparação de AQS são, numa situação considerando que a fonte de energia utilizada no apoio à preparação de AQS é a electricidade e noutra situação a fonte de energia é o gás natural. Os valores referentes à utilização de electricidade e gás natural são os apresentados como sendo  $N_{ac1}$  e  $N_{ac2}$  respectivamente.

Quadro 4.9: Valores de necessidades de energia para preparação de AQS tendo em conta os valores de produção obtidos através do SolTerm

Local	$E_{\text{solar}}$ (kWh/ano)	$N_{ac1}^{1)}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	$N_{ac2}^{2)}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)
Lisboa	1929	20,96	62,29
Faro	2022	19,63	58,54
Bragança	1753	23,47	58,44
Porto	1641	25,07	59,77
Évora	2015	19,73	63,89

<sup>1)</sup>necessidades de energia para preparação de AQS utilizando para o apoio a electricidade

<sup>2)</sup>necessidades de energia para preparação de AQS utilizando para o apoio o gás natural

Apresentadas as necessidades de AQS tendo em conta a quantidade de energia fornecida pelo colector solar procede-se à determinação das necessidades totais de energia final considerando apenas a situação da utilização de electricidade. Este valor da energia final total foi obtido com base na expressão 4.5 tendo em conta que as necessidades de AQS são diferentes (quadro 4.10).

Com base nos valores apresentados no quadro 4.10 e na expressão 4.6 é possível obter assim as necessidades globais anuais nominais específicas de energia primária tendo em conta a energia produzida pelo colector solar. Os valores dessas necessidades são apresentados no quadro 4.11.

Quadro 4.10: Valores de necessidades de energia final total considerando a produção do colector solar

Local	$N_{t2}^{1)}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)
<b>Bragança</b>	67,15
<b>Évora</b>	49,35
<b>Faro</b>	45,02
<b>Lisboa</b>	48,01
<b>Porto</b>	52,18

<sup>1)</sup> necessidades totais de energia final com contabilização da energia produzida pelo colector solar

Relativamente ao quadro 4.11, os valores apresentados na primeira coluna ( $N_{tp3}$ ) são obtidos tendo em consideração que foi utilizada electricidade para a produção de AQS e os valores da segunda coluna ( $N_{tp4}$ ) diferem dos da primeira pois é considerado que a preparação de AQS é feita por meio de gás natural, alterando assim os factores de conversão tanto no cálculo das necessidades de energia para a preparação de AQS como nas necessidades globais anuais nominais específicas de energia primária.

Quadro 4.11: Necessidades globais anuais nominais específicas de energia primária

Local	$N_{tp3}^{1)}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	$N_{tp4}^{2)}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)
<b>Bragança</b>	222,28	229,29
<b>Évora</b>	163,35	177,66
<b>Faro</b>	149,01	163,52
<b>Lisboa</b>	158,93	170,84
<b>Porto</b>	172,72	176,61

<sup>1)</sup> necessidades globais nominais de energia primária com preparação de AQS com uso de electricidade tendo em conta a energia produzida pelo colector solar

<sup>2)</sup> necessidades globais nominais de energia primária com preparação de AQS com uso de gás natural tendo em conta a energia produzida pelo colector solar

#### **4.4- Análise de resultados**

A análise de resultados vai ser efectuada em três fases distintas: (i) comparações em termos de energia final, (ii) comparações em termos de energia primária e (iii) comparações em termos de emissões equivalentes de CO<sub>2</sub>.

##### **4.4.1- Comparação em termos de energia final**

Com base nos resultados anteriormente apresentados, pretende-se nesta secção realizar comparações de produção versus necessidades de energia final com o objectivo de verificar o alcance de um edifício de balanço energético quase nulo (*nZEB*).

Numa análise inicial, para efeitos de comparação necessidades versus produção, são consideradas necessidades totais com base nos limites máximos impostos pelo RCCTE, sem contabilização da produção de AQS por parte do colector solar e admitindo que a fonte de energia utilizada para a preparação de AQS é a electricidade (quadro 4.5). Com esta consideração é feita a análise de uma habitação não provida de sistema solar térmico.

Quanto aos valores de produção, considerados apenas devido à contribuição do sistema fotovoltaico serão utilizados os correspondentes à solução que obteve melhores resultados em termos de produção anual total por metro quadrado de pavimento, ou seja, a solução baseada em módulos de silício monocristalino da GooSun. Outra solução também eficiente que poderia ser considerada é a solução baseada em módulos policristalinos da Martifer Solar. Os relatórios obtidos no PVsyst para estas duas soluções encontram-se no anexo III. Na figura 4.24 são então apresentados estes valores. No quadro II.3 do anexo II encontram-se os valores de necessidades totais já convertidas em energia final e da quantidade de energia produzida.

Em ambas as figuras 4.28 e 4.29 a linha a tracejado representa a linha de *nZEB*. Esta linha representa a divisão entre uma habitação com falta de produção eléctrica (abaixo da linha) ou com excesso de produção eléctrica (acima da linha).

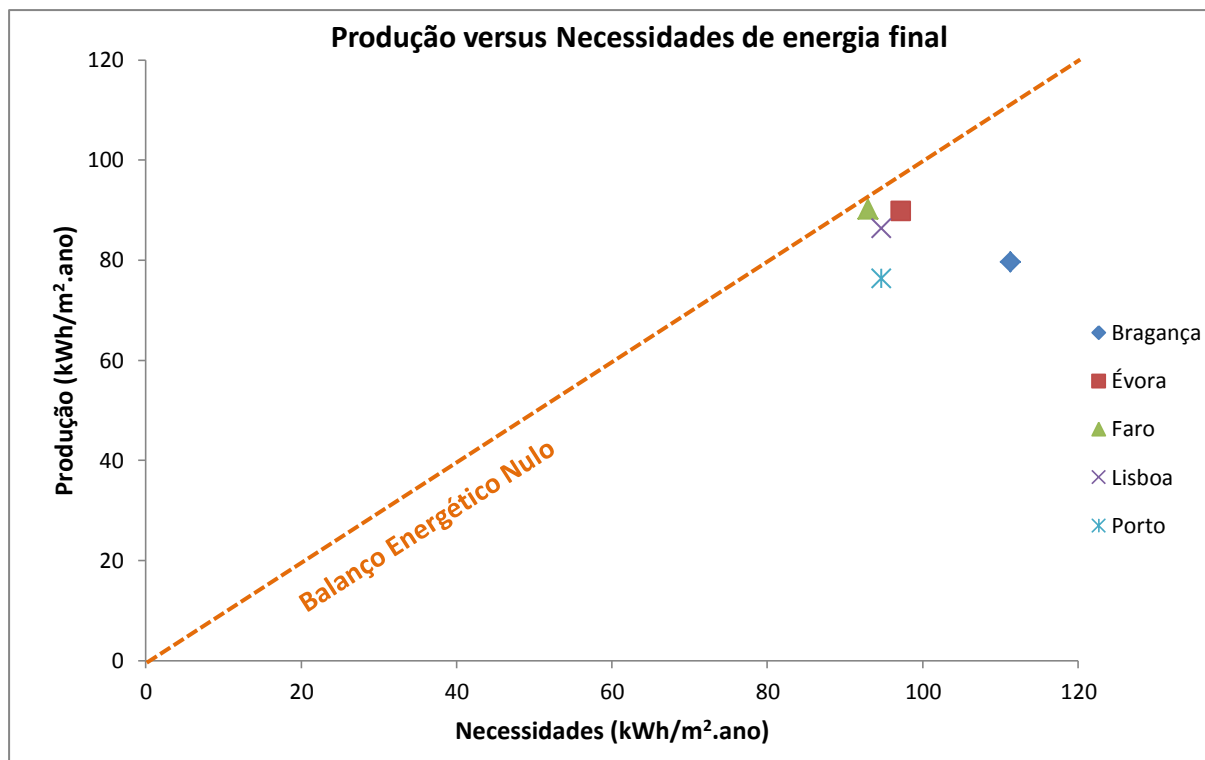


Figura 4.28: Comparação entre produção e necessidades de energia final sem contabilização da energia produzida pelo colector solar

Com base na figura 4.28 conclui-se que o edifício provido apenas de um sistema fotovoltaico monocristalino da GooSun não é suficiente para cobrir todas as necessidades de consumo. Apesar disso observa-se que nalguns casos, como Faro ou Évora, os valores encontram-se muito próximos do estatuto de *nZEB*. Logo, será espectável que com a contabilização do sistema solar térmico o edifício se torne *nZEB* ou até mesmo ultrapasse a linha de balanço energético nulo.

Neste caso procedeu-se a uma comparação entre a produção e necessidades, que não tem em consideração a energia que é produzida e consumida no local, ou seja, a água quente produzida pelo colector solar. Assim sendo, procede-se seguidamente a uma segunda análise comparativa, que considera na energia necessária para o aquecimento de águas quentes sanitárias o valor correspondente à quantidade de AQS produzida pelo colector solar, cujo apoio continua a ser feito com recurso à electricidade. Esta corresponde à comparação entre a energia “importada” para a habitação e energia “exportada” para a rede eléctrica. Na figura 4.29 estão representados os valores correspondentes a esta análise sendo os valores detalhados remetidos em anexo (quadro II.4).

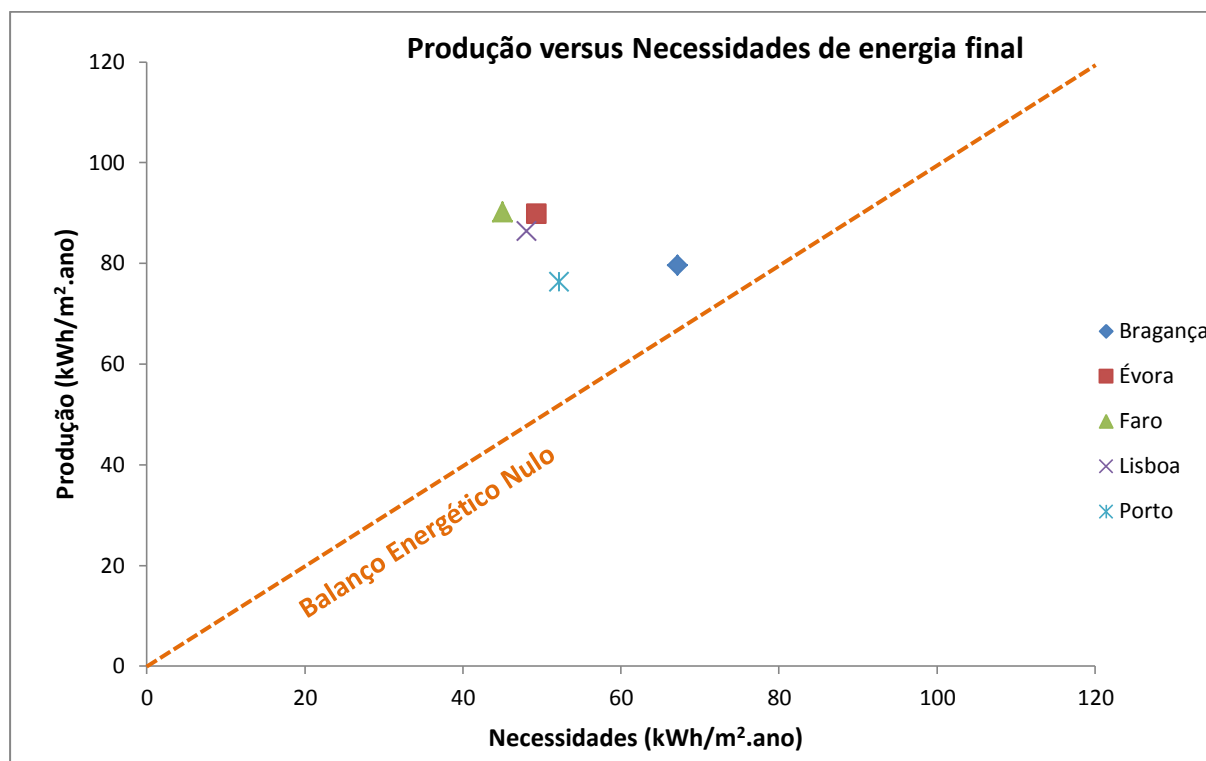


Figura 4.29: Comparação entre produção e necessidades de energia final tendo em conta a produção do colector solar

Como se pode observar a partir da figura 4.29, a consideração da água quente produzida pelo colector solar fez com que a habitação ficasse com um balanço energético positivo (*plus ZEB*), ou seja, a habitação produz mais do que necessita. Assim sendo pode-se concluir através de uma comparação entre energia final necessária para consumo e a energia eléctrica produzida, que esta solução é mais que suficiente para o alcance de um estatuto “*site nZEB*”.

#### 4.4.2- Comparação em termos de energia primária

De seguida vão ser realizadas análises comparativas entre as necessidades globais anuais nominais de energia primária e os valores de produção também em energia primária. Mostrou-se necessário efectuar estas comparações em termos de energia primária para verificar se seria alcançado o estatuto de “*source nZEB*”. A comparação segundo estes termos serve para se observar se segundo um balanço energético em energia primária também era alcançado o estatuto de *nZEB*. Estas análises foram efectuadas com recurso aos valores de necessidades obtidos nos quadros 4.6 e 4.11 previamente apresentadas.

Na figura 4.30 estão apresentados os valores da comparação necessidades versus produção, considerando apenas o uso de electricidade para efeitos de climatização e produção de AQS. No quadro II.5 do anexo II estão apresentados os valores detalhados desta comparação.

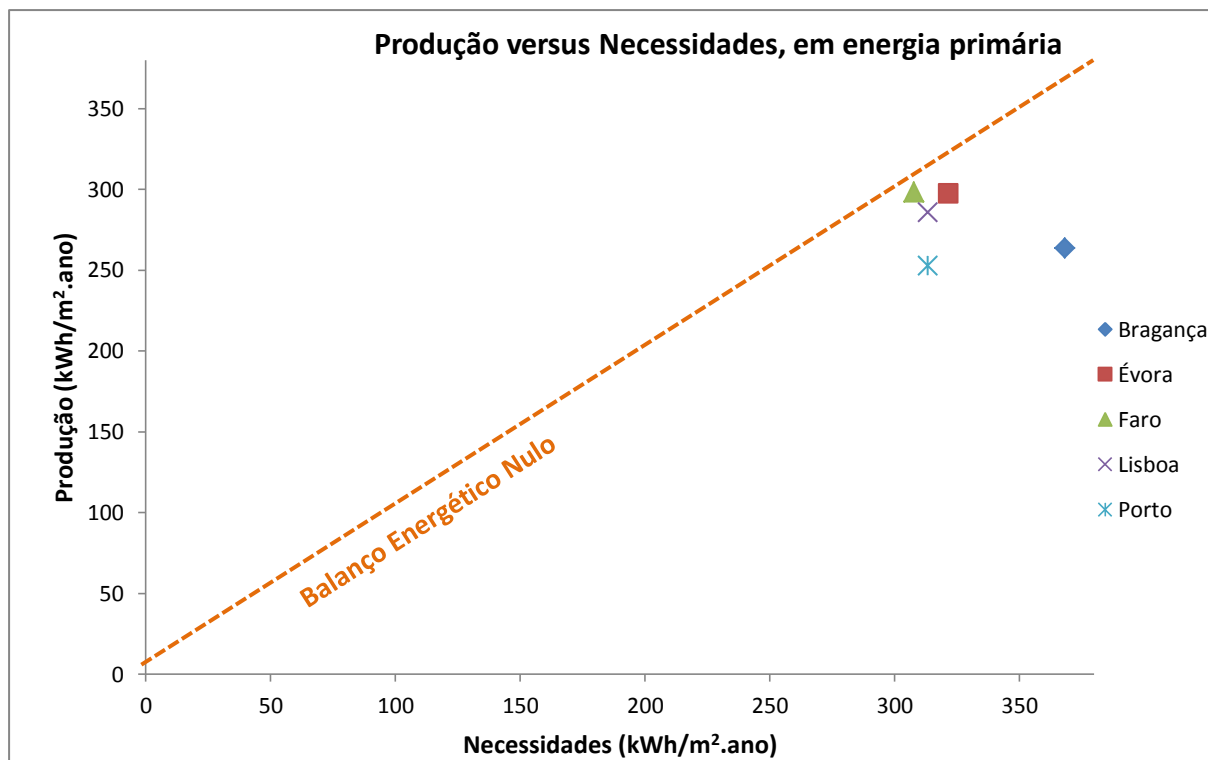


Figura 4.30: Comparação entre necessidades globais anuais nominais de energia primária e produção de energia primária (sem colector, com electricidade)

Da observação da figura anterior pode-se concluir que caso a comparação seja feita em termos de energia primária, sem contabilização da energia fornecida pelo colector solar e apenas utilizando electricidade como fonte de energia para produção de AQS, o sistema fotovoltaico não se mostra suficientemente eficaz para suprir as necessidades de energia da habitação. Em Évora, Faro e Lisboa por muito pouco não é alcançado o estatuto de *nZEB*, logo será de esperar que este seja alcançado nas comparações seguintes. De notar, que tal como acontece na análise comparativa equivalente mas em energia final esta também não se mostrava suficiente para suprir as necessidades de energia da habitação.

Na figura 4.31 é executada a mesma análise que na figura 4.30 com a diferença de que neste caso o gás natural é utilizado na preparação de AQS em vez de electricidade. No quadro II.5 do anexo II estão apresentados os valores detalhados desta comparação.



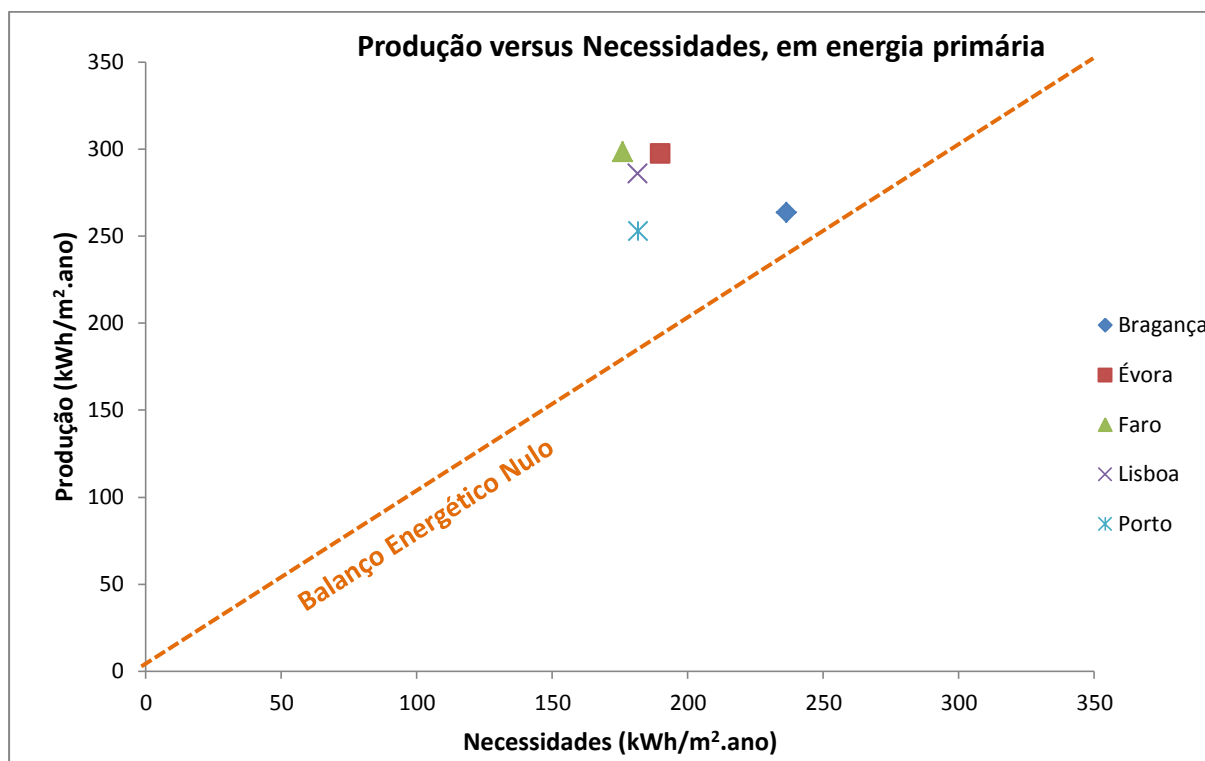


Figura 4.31: Comparação entre necessidades globais anuais nominais de energia primária e produção de energia primária (sem colector, com electricidade e gás natural)

Como se pode observar na figura anterior a habitação produz mais energia do que necessita, esta diferença em relação à situação anterior deve-se à alteração da energia utilizada na preparação das águas quentes sanitárias que anteriormente era a electricidade e neste caso é o gás natural. Esta alteração fez com que o factor de conversão em energia primária utilizado fosse diferente levando assim à diminuição das necessidades em energia primária. Esta alteração mostrou-se benéfica caso a habitação em causa não estivesse provida de colector solar. Uma vez que no caso de estudo a habitação está provida de colector solar serão feitas duas análises suplementares em que para o cálculo das necessidades de energia para a preparação de AQS é tida em conta a energia produzida pelo colector solar.

Nas figuras 4.32 e 4.33 são apresentadas as comparações Necessidades versus Produção de energia primária efectuadas, tendo sido contabilizada a energia produzida pelo colector solar em conjunto com a produção fotovoltaica. É de referir que a fonte de energia considerada para o apoio ao sistema solar foi a electricidade na análise efectuada na figura 4.32 e gás natural na análise da figura 4.33. No quadro II.5 do anexo II estão apresentados os valores detalhados destas comparações.

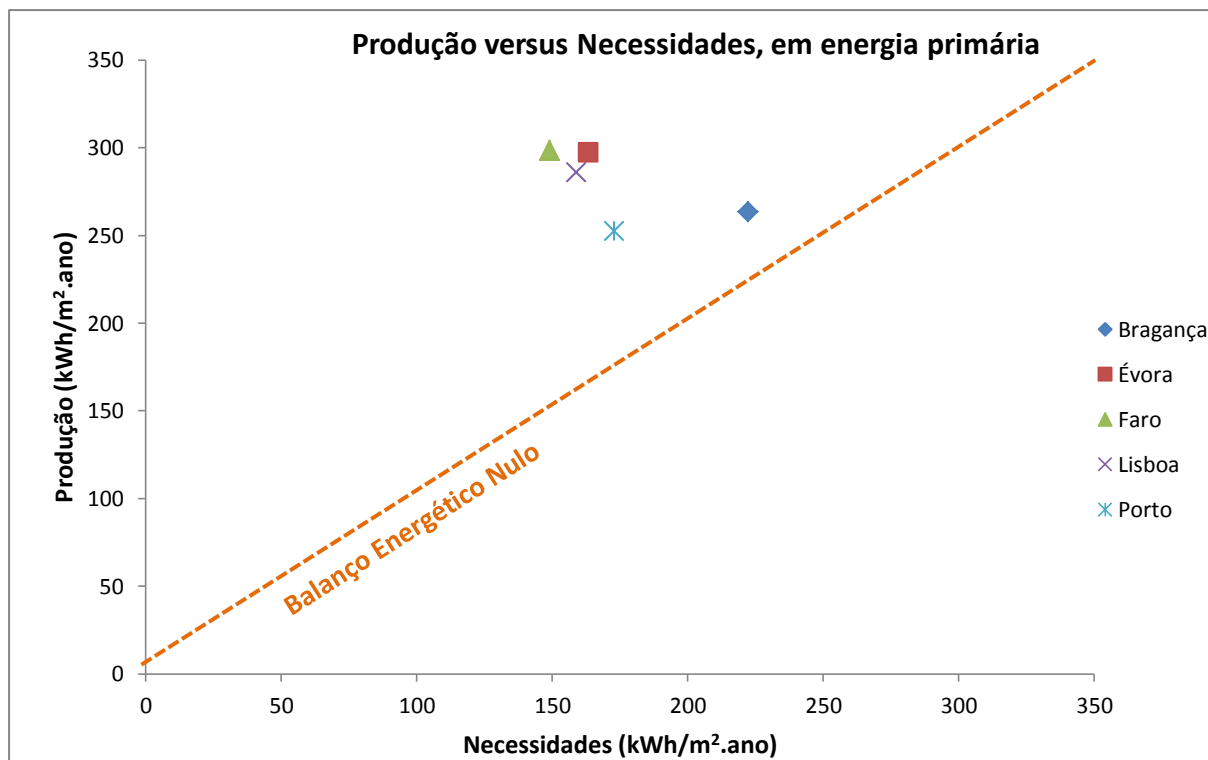


Figura 4.32: Comparação entre necessidades globais anuais nominais de energia primária e produção de energia primária considerando produção do colector solar (com electricidade)

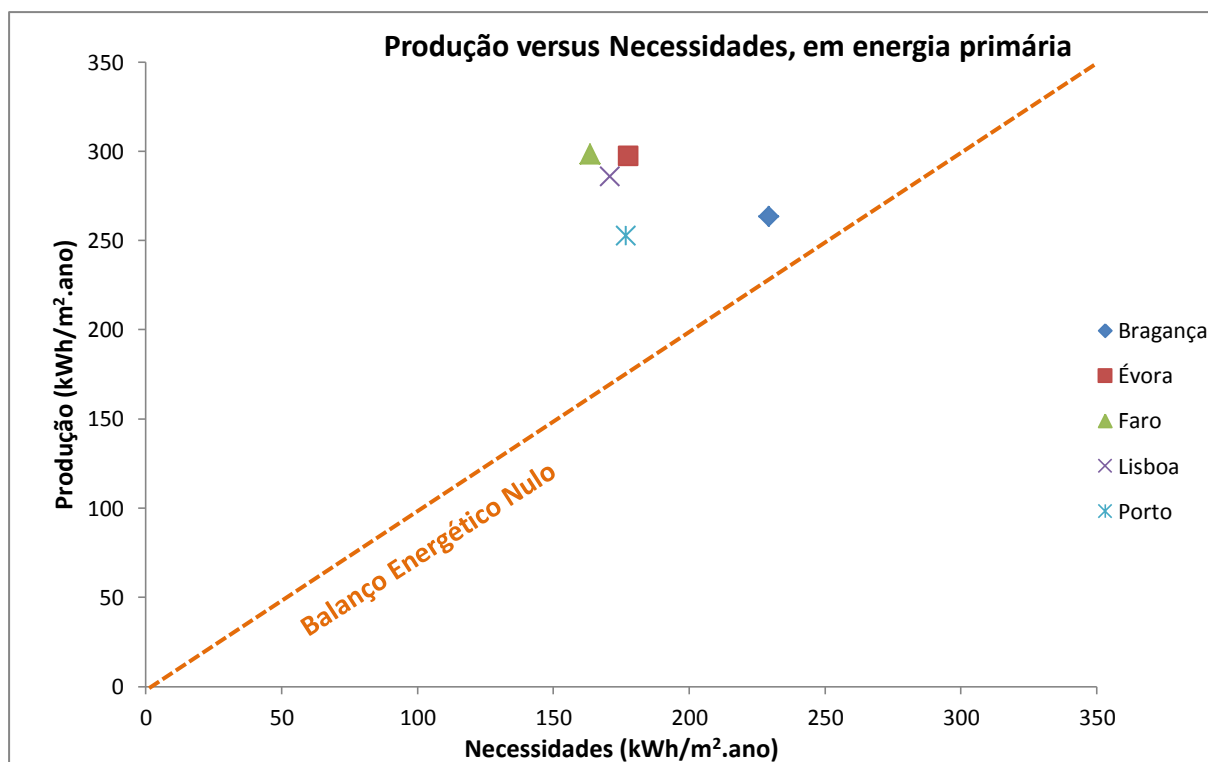


Figura 4.33: Comparação entre necessidades globais anuais nominais de energia primária e produção de energia primária considerando produção do colector solar (com electricidade e gás natural)

Através da observação das figuras 4.32 e 4.33 conclui-se que as necessidades nominais de energia primária são bastante diminuídas. De constatar também que em todos os locais onde se insira o sistema adoptado estes estão acima da linha de balanço energético nulo, apontando um balanço energético positivo

Pode-se concluir através da observação da figura 4.33 que com a utilização de gás natural como apoio ao sistema solar em vez de electricidade faz com que as necessidades de consumo em energia primária aumentem. O aumento destas necessidades deve-se ao facto de no cálculo das necessidades de energia para preparação de AQS estas serem afectadas pela eficiência da conversão do sistema de preparação das AQS. Caso não esteja definido em projecto o sistema de preparação de AQS, a situação mais penalizadora é quando é escolhida a utilização do gás natural pois, o RCCTE impõe um factor de conversão bastante inferior quando comparado com um sistema a electricidade [8]. Apesar do aumento das necessidades totais em energia primária, o balanço energético da habitação mantém-se positivo para todas as zonas climáticas. Assim sendo e apesar de a electricidade possuir um factor de conversão mais penalizador, a solução em que é utilizada electricidade para suprir as necessidades de aquecimento, arrefecimento e de preparação de AQS mostrou-se a mais vantajosa em termos de valores de necessidades de energia primária.

De seguida, apresentam-se na figura 4.34 todos os resultados de necessidades versus produção de energia primária obtidos para uma melhor comparação destes valores.

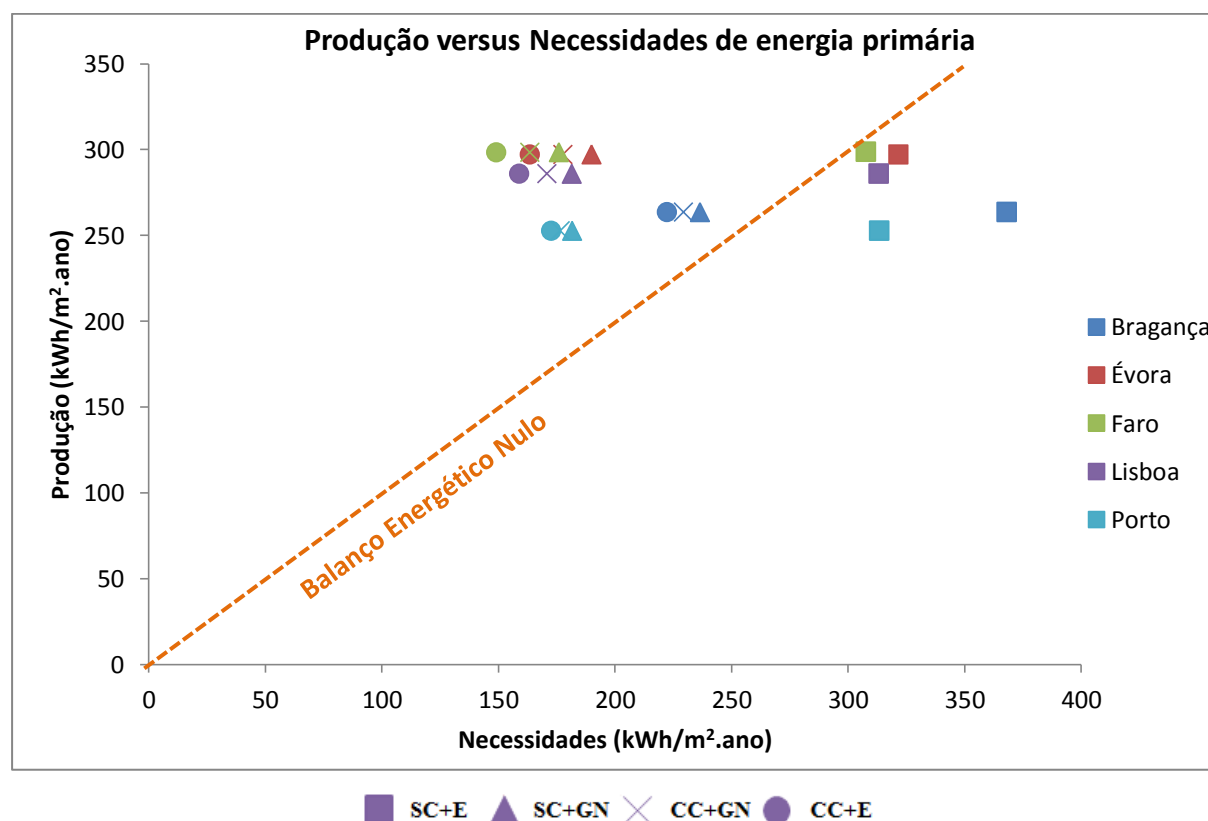


Figura 4.34: Comparação entre necessidades globais anuais nominais de energia primária e produção de energia primária para todas as localidades e soluções  
No quadro 4.12 é feito um balanço energético entre a energia primária produzida e as necessidades globais anuais nominais de energia primária para uma melhor verificação da mais eficiente solução.

Quadro 4.12: Balanços energéticos por localidade e solução

Local	Balanços Energéticos (kWh/m <sup>2</sup> .ano)			
	SC+E <sup>1)</sup>	SC+GN <sup>2)</sup>	CC+E <sup>3)</sup>	CC+GN <sup>4)</sup>
<b>Bragança</b>	-104,69	27,09	41,29	34,28
<b>Évora</b>	-24,48	107,29	133,89	119,58
<b>Faro</b>	-9,20	122,58	149,51	135,00
<b>Lisboa</b>	-27,30	104,48	127,01	115,10
<b>Porto</b>	-60,71	71,06	79,97	76,08

<sup>1)</sup> balanço energético para as soluções sem contabilização do colector solar e a energia utilizada para a preparação de AQS é a electricidade

<sup>2)</sup> balanço energético para as soluções sem contabilização do colector solar e a energia utilizada para a preparação de AQS é o gás natural

<sup>3)</sup> balanço energético para as soluções com contabilização do colector solar e a energia utilizada para o apoio na preparação de AQS é a electricidade

<sup>4)</sup> balanço energético para as soluções com contabilização do colector solar e a energia utilizada para o apoio na preparação de AQS é o gás natural

Da observação da figura 4.34 e do quadro 4.12 pode-se concluir facilmente que a solução que melhor desempenho obteve foi na que se teve em conta a quantidade de energia produzida pelo colector solar para a preparação de AQS e o apoio para a preparação de AQS e para o aquecimento e arrefecimento é feito com recurso a electricidade. Como seria de esperar de entre todas as localidades a que apresenta melhores valores de produção e balanço energético é a localidade de Faro.

Outro aspecto também importante de salientar é o facto de a habitação se tornar *nZEB* para todas as localidades com excepção da solução em que não é tida em conta a energia produzida pelo colector solar e é considerada para o apoio na preparação de AQS e para o aquecimento e arrefecimento a electricidade. Também de salientar que apesar de a pior situação ser a situação em que é utilizada electricidade tanto para climatização como para preparação de AQS esta torna-se a melhor solução quando é tomada em consideração a energia produzida pelo colector solar, isto deve-se ao facto de no calculo das necessidades nominais de energia para preparação de AQS a electricidade possuir um factor menos penalizador, ficando assim o valor de necessidades globais inferior.

#### 4.4.3- Comparação em termos de emissões equivalentes de CO<sub>2</sub>

Por fim e a jeito de conclusão é feita uma análise, apenas para as duas situações finais, em termos de emissões equivalentes de CO<sub>2</sub>. Esta análise foi realizada com vista a averiguar a possibilidade dos sistemas alcançarem o estatuto de “*emission nZEB*”. A metodologia de cálculo é igual à metodologia

utilizada para as análises efectuadas em termos de energia primária. As conversões de energia final em emissões equivalentes de CO<sub>2</sub> são efectuadas com base na expressão 4.6 com a diferença dos factores de conversão utilizados que neste caso são os seguintes [6, 21, 33]:

- a. electricidade:  $F_{pu}=617 \text{ g/kWh}_{\text{final}}$ ;
- b. gás natural:  $F_{pu}=277 \text{ g/kWh}_{\text{final}}$ .

Assim sendo, obtêm-se os seguintes valores de necessidades globais nominais de energia em emissões equivalentes de CO<sub>2</sub>. Para uma melhor análise dos valores são apresentados os valores de balanço energético entre as emissões equivalentes de CO<sub>2</sub> produzidas pelas necessidades energéticas da habitação e as emissões evitadas por parte da produção fotovoltaica.

Quadro 4.13: Necessidades globais anuais nominais específicas de energia em emissões equivalentes de CO<sub>2</sub>

Local	$N_{tp5}^{1)}$ (kg/m <sup>2</sup> .ano)	$N_{tp6}^{2)}$ (kg/m <sup>2</sup> .ano)	Produção Fotovoltaica (kg/m <sup>2</sup> .ano)	Balanço Energético (kg/m <sup>2</sup> .ano)	
				CC+E	CC+GN
<b>Bragança</b>	41,43	44,20	49,13	7,7	4,93
<b>Évora</b>	30,45	34,49	55,41	24,96	20,92
<b>Faro</b>	27,78	31,85	55,64	27,86	23,79
<b>Lisboa</b>	29,62	33,25	53,30	23,68	20,05
<b>Porto</b>	32,20	34,42	47,10	14,9	12,68

<sup>1)</sup> necessidades globais nominais de energia em emissões equivalentes de CO<sub>2</sub> com preparação de AQS com uso de electricidade tendo em conta a energia produzida pelo colector solar

<sup>2)</sup> necessidades globais nominais de energia em emissões equivalentes de CO<sub>2</sub> com preparação de AQS com uso de gás natural tendo em conta a energia produzida pelo colector solar

Nas figuras 4.35 e 4.36 são apresentadas as análises efectuadas entre as necessidades globais anuais nominais de energia e os valores de produção solar. Os valores apresentados nestas situações foram comparados em termos de emissões equivalentes de CO<sub>2</sub>. Os valores detalhados referentes a estas comparações encontram-se apresentados no quadro II.6 do anexo II.

Na figura 4.35 estão apresentados os valores de comparação entre as emissões equivalentes de CO<sub>2</sub> produzidas pela habitação dadas as suas necessidades quando a energia utilizada tanto para o aquecimento, o arrefecimento e a preparação de AQS é a electricidade. A produção também é apresentada em emissões equivalentes de CO<sub>2</sub>, mas neste caso as emissões são evitadas em vez de produzidas. Na figura 4.36 é efectuada a mesma comparação que na figura 4.35 mas nesta situação a energia utilizada para a preparação de AQS é o gás natural.

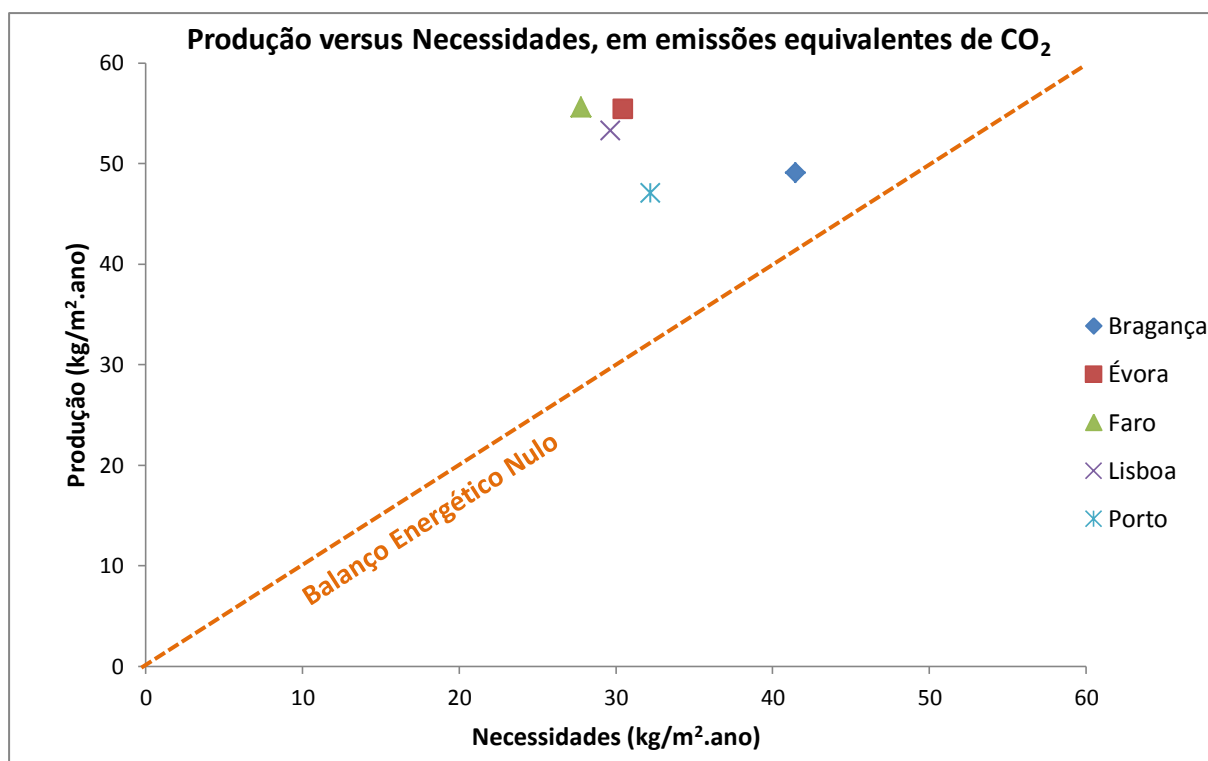


Figura 4.35: Comparação entre necessidades globais anuais nominais de energia em emissões equivalentes de CO<sub>2</sub> e produção de energia em emissões equivalentes de CO<sub>2</sub> considerando produção do colector solar (com electricidade)

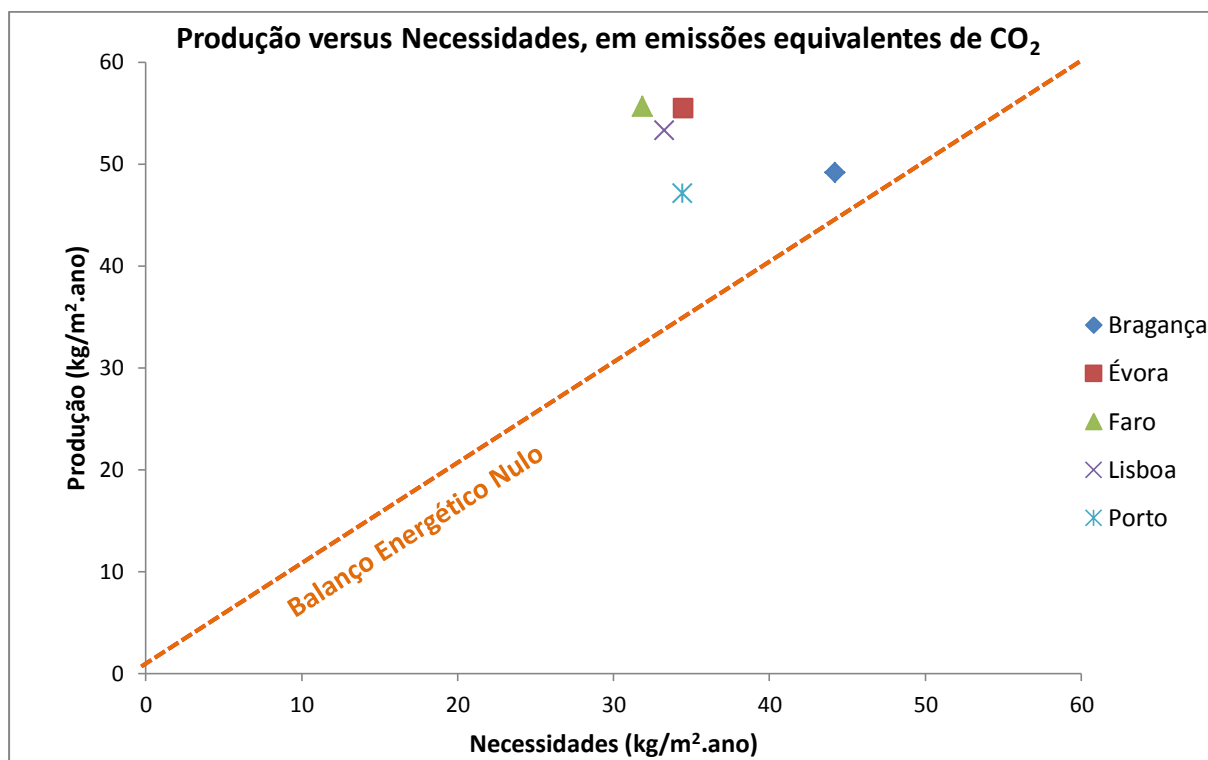


Figura 4.36: Comparação entre necessidades globais anuais nominais de energia em emissões equivalentes de CO<sub>2</sub> e produção de energia em emissões equivalentes de CO<sub>2</sub> considerando produção do colector solar (com electricidade e gás natural)

Como se pode observar pelas figuras 4.35 e 4.36 e do quadro 4.13 é possível evitar-se emissões de carbono, ou seja, alcançar o estatuto de “*Zero Carbon Buildings*”, com a aplicação destas soluções tanto com a utilização apenas de electricidade para o aquecimento, arrefecimento e para a produção de AQS como é o caso da figura 4.35 ou com a utilização mais convencional em que é utilizada electricidade para a climatização e gás natural para a preparação de AQS (figura 4.36). Pode-se observar que as soluções analisadas não só evitam as emissões que seriam de esperar caso não fosse instalado nenhum sistema solar como evitam ainda mais emissões. Tendo em conta uma visão mais global, como se evitam emissões para além daquelas que seriam produzidas pela habitação, estas podem equilibrar as emissões de outras habitações que não sejam tão eficientes, podendo assim levar a um equilíbrio de emissões de CO<sub>2</sub> a nível de localidades, países ou mundial.

---



## **CAPÍTULO V**

### **CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES**

### **DESENVOLVIMENTOS FUTUROS**

#### **5.1- Considerações iniciais**

Esta dissertação teve como objectivo avaliar, do ponto de vista numérico, a contribuição de sistemas solares térmicos e fotovoltaicos com vista a averiguar o potencial alcance de balanço energético nulo ou quase nulo (*nZEB*) dos edifícios residenciais unifamiliares.

Com vista a alcançar este fim, foram analisados sistemas solares fotovoltaicos com apoio do programa de simulação PVsyst e sistemas solares térmicos com apoio do programa SolTerm com o objectivo de equilibrar as necessidades de um edifício de habitação unifamiliar tomado como caso de estudo, cujos valores das necessidades energéticas para climatização e AQS foram considerados iguais aos máximos regulamentares impostos pelo RCCTE. Os valores obtidos foram apresentados, analisados e comparados entre si, averiguando assim se o objectivo teria sido alcançado.

Neste capítulo indicam-se os comentários finais ao trabalho desenvolvido, sintetizam-se as conclusões obtidas, confrontam-se os objectivos propostos e os alcançados e referem-se possíveis desenvolvimentos futuros.

#### **5.2- Conclusões e comentários finais**

No âmbito do presente trabalho, a temática dos *nZEBs* foi abordada sob dois pontos de vista, um energético, e um em termos de emissões.

A análise sob o ponto de vista de energia final, ou seja, baseada na análise comparativa simples entre energia entregue à rede eléctrica e a energia fornecida pela rede eléctrica, sendo assim possível concluir que no caso da existência do sistema solar térmico e fotovoltaico é possível alcançar o estatuto de “*site nZEB*”.

Ainda no mesmo âmbito, as análises comparativas sob o ponto de vista de energia primária, realizadas com recurso à aplicação de factores de conversão (de energia final em energia primária) válidos para a UE [6, 21, 31] mostraram a mesma tendência, apontando o elevado potencial para o alcance de um balanço energético nulo para todas as zonas climáticas analisadas.

---

Verificou-se que esta hipótese apenas não é verificada no caso em que não é contabilizada a energia produzida pelo sistema solar térmico em que é utilizada electricidade para a preparação de AQS.

Contudo, é de referir que mesmo o cenário simulado se tratar da situação mais gravosa, pois são considerados os valores limite regulamentares impostos pelo RCCTE tanto para as necessidades de climatização como de preparação de AQS, não sendo assim efectuadas quaisquer medidas passivas melhoria da eficiência energética do edifício, este alcançou para praticamente todas as situações o estatuto de *nZEB*. Será de esperar que com a eficiência energética do edifício melhorada, os valores das necessidades sejam muito menores, levando assim a um balanço ainda mais positivo, ou à necessidade de aplicação de menor área de módulos fotovoltaicos.

Sob o ponto de vista das análises comparativas em termos de emissões equivalentes de CO<sub>2</sub>, estes mostraram que foi possível alcançar o estatuto de *emission nZEB* para ambas as situações comparadas. É possível concluir também que apesar de a situação se tratar da situação mais gravosa, como foi referido anteriormente, e apesar de o colector solar utilizado ser de baixo rendimento, foi possível alcançar o estatuto de *nZEB* o que mostra que em Portugal será fácil, do ponto de vista técnico, o alcance destes edifícios.

De modo geral, uma vez que o objectivo da dissertação consistia na integração de ambos os sistemas solares, pode-se concluir que o objectivo de alcançar o estatuto *nZEB* através destas soluções solares foi alcançado com sucesso.

### **5.3- Desenvolvimentos futuros**

Referem-se nesta secção algumas sugestões que se julga serem importantes para desenvolvimentos futuros no âmbito de aplicação de sistemas solares térmico e fotovoltaicos:

- extensão do estudo de potencial contribuição dos sistemas solares térmicos e fotovoltaicos no balanço energético de edifícios de habitação multifamiliar;
- estudar a contribuição dos sistemas solares térmicos e fotovoltaicos em conjunto com a aplicação de medidas passivas para a redução das áreas fotovoltaicas instaladas;
- estudo da contribuição dos sistemas solares térmicos e fotovoltaicos em conjunto com a eficiência energética de equipamentos de climatização e iluminação;
- realizar estudos sobre a viabilidade económica adjacente à aplicação dos sistemas solares fotovoltaicos e térmicos;
- estudar a contribuição de diversos sistemas de aproveitamento de energia renovável no balanço energético de edifícios de habitação unifamiliar e multifamiliar.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] AFONSO, M. – *Sistema de Monitorização de Condições Meteorológicas e Correlação com Produção Renovável de Energia*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova, Lisboa, 2010.
- [2] AGUIAR, R.; COELHO, R. – *Manual de Instalação e Utilização do software SolTerm, Versão 1.9*. LNEG, Lisboa, Maio 2010.
- [3] AGUIAR, R.; COELHO, R.; CARVALHO, M. – *Software SolTerm, Versão 5.1.3*. Lisboa, Maio 2010.
- [4] CASTRO, R. – *Uma Introdução às Energias Renováveis: Eólica, Fotovoltaica e Mini-Hídrica*. Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2011.
- [5] CELLURA, M.; GANGI, A.; LONGO, S.; ORIOLI, A. – *Photovoltaic electricity scenario analysis in urban contexts: An Italian case study*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 16, págs. 2041-2052, Elsevier, 2012.
- [6] COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION (CEN) – *Energy performance of buildings – Overall energy use and definition of energy ratings*. EN 15603:2008. CEN, January 2008.
- [7] DECRETO-LEI nº25/2012. DR. 1ª Série nº26 (06/02/2012) págs. 589-590.
- [8] DECRETO-LEI nº80/2006. DR. Nº67 Série I-A (04/04/2006) págs. 2468-2513.
- [9] DECRETO-LEI n.º118-A/2010. DR. 1ª Série n.º207 (25/10/2010) págs. 4834-(2) – 4834-(15).
- [10] DIRECTIVA 2001/77/CE DO PARLAMENTO EUROPEU E DO CONSELHO de 27/09/2001 relativa à promoção da electricidade produzida a partir de fontes de energia renováveis no mercado interno da electricidade (27/10/2001) págs. L283/33-L283/40.
- [11] DIRECTIVA 2010/31/CE DO PARLAMENTO EUROPEU E DO CONSELHO de 19/05/2010 relativa ao desempenho energético de edifícios (reformulação), Jornal Oficial da União Europeia (18/06/2010) págs. L153/13-L153/35.
- [12] EUROPEAN COMMISSION – *EU 27 Energy Key Figures*. Apresentação, Junho 2011.

- 
- [13] EUROPEAN COUNCIL FOR NA ENERGY EFFICIENT ECONOMY – *Steering Through the Maze #2, Nearly Zero Energy Buildings: achieving the EU 2020 target*. eceee Secretariat, Sweden, updated 08/02/2011.
- [14] FRANCISCO, R. – *Aplicação informática para o estudo da viabilidade técnico-económica de uma habitação sustentável*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova, Lisboa, 2010.
- [15] GONÇALVES, H. – *Em direcção aos Edifícios de Balanço Energético Zero*. Apresentação no âmbito das Jornadas da Climatização, Ordem dos Engenheiros, 13/10/2011.
- [16] GRAÇA, G.; AUGUSTO, A.; LERER, M. – *Solar powered net zero energy houses for Southern Europe: Feasibility study*. Solar Energy 86, págs. 634-646, Elsevier, Dezembro 2011.
- [17] GREEN, M.; EMERY, K.; HISHIKAWA, Y.; WARTA, W.; DUNLOP, E. – *Solar cell efficiency tables (Version 39)*. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Volume 20, Issue 1, págs.12-20, Janeiro 2012.
- [18] GREEN PRO – *Manual Fotovoltaico*. Janeiro 2004.
- [19] GREEN PRO – *Manual Solar Térmico*. Janeiro 2004.
- [20] GUIMARÃES, M. – *Comportamento de Células Solares Fotovoltaicas de Si-a em Campo e a sua Degradação*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova, Monte da Caparica, 2010.
- [21] HAASE, M.; NOVAKOVIC, V. – *Renewable energy application in zero emission buildings – a case study*. Renewable Energy Conference 2010, Trondheim, Norway, 2010.
- [22] INETI; SPES – *Instalações Solares Térmicas*. Manual no âmbito do curso de instaladores solares térmicos, Lisboa, Outubro 2006.
- [23] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - *World Energy Outlook 2011, Presentation to the press*. London, 09/11/2011.
- [24] KAZMERSKI, L. - *Best Research: Cell Efficiencies*. National Renewable Energy Laboratory, Fevereiro 2012.
- [25] LEOTE, R. – *Electrificação de serviços primários em povoados remotos africanos recorrendo a sistemas solares fotovoltaicos (PV)*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova, Lisboa, 2009.

- [26] LUQUE, A.; HEGEDUS, S. – *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*. Edições Wiley, 2002.
- [27] MARKVART, T.; CASTAÑER, L. – *Practical Handbook of Photovoltaics Fundamentals and Applications*. Elsevier, 2003.
- [28] MERMOUD, A. – *Software PVsyst, Versão 5.0*. Genebra, 2010.
- [29] MINISTÉRIO DA ECONOMIA, DA INOVAÇÃO E DO DESENVOLVIMENTO – *Plano Novas Energias – ENE 2020*. 2010.
- [30] CONSELHO DE MINISTROS – *Portugal 2020 – Programa Nacional de Reformas* – aprovado em conselho de ministros (20/03/2011).
- [31] RESOLUÇÃO DE CONSELHO DE MINISTROS nº29/2010. DR. 1ª Série nº73 (15/04/2010) págs. 1289-1296.
- [32] RESOLUÇÃO DE CONSELHO DE MINISTROS nº80/2008. DR. 1ª Série nº97 (20/05/2012) págs. 2824-2865.
- [33] SARTORI, I.; NAPOLITANO, A.; KARSTEN, V. – *Net zero energy buildings: A consistent definition framework*. Energy and Buildings 48, págs. 220-232, Elsevier, 2012.
- [34] SHAARI, S.; BOWMAN, N. – *Photovoltaics in buildings: A case study for rural England and Malaysia*. Renewable Energy 15, págs. 558-561, Pergamon, 1998.
- [35] SOLMETRIC CORPORATION - *Guide to Interpreting I-V Curve Measurements of PV Arrays*. 01/03/2011.
- [36] STEVANOVIC, S.; PUCAR, M. – *Investment appraisal of a small, grid-connected photovoltaic plant under the Serbian feed-in tariff framework*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 16, págs. 1673-1682, Elsevier, 2012.
- [37] TORCELLINI, P. – *ZEB HVAC Systems and Controls*. PhD Summer Workshop on Net Zero Energy Solar Buildings: Theory, Modeling and Design, Montreal, 20-25 Junho 2011.
- [38] TORCELLINI, P.; PLESS, S.; DERU, M.; CRAWLEY, D. – *Zero Energy Buildings: A Critical Look at the Definition*, paper presented at ACEEE Summer Study, California, 2006.
- [39] UNIVERSIDADE DE GENEBRA – *User's Guide, PVsyst Contextual Help*. Genebra, 1994-2010.

- 
- [40] Website: <http://buildipedia.com/go-green/sustainable-materials-methods/principles-and-components-of-geothermal-heat-pump-systems> - *Principles and Components of Geothermal Heat Pump Systems*, em Março de 2012.
- [41] Website: [http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/europe\\_2020\\_indicators/headline\\_indicators](http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/europe_2020_indicators/headline_indicators) – *Europe 2020 Indicators*, em Janeiro de 2012.
- [42] Website: <http://www.cascaisennergia.org/Solar-T%C3%A9rmica---Tecnologia.aspx?ID=111> – *Solar Térmica: Tecnologia*, em Março de 2012.
- [43] Website: [http://www.dn.pt/inicio/ciencia/interior.aspx?content\\_id=1406981&seccao=Biosfera](http://www.dn.pt/inicio/ciencia/interior.aspx?content_id=1406981&seccao=Biosfera) – *Eólicas domésticas ajudam a diminuir conta de electricidade*, em Dezembro de 2011.
- [44] Website: [http://www.efacec.pt/PresentationLayer/efacec\\_projecto\\_00.aspx?idioma=1&area=2&competenciaid=0&projectoid=144](http://www.efacec.pt/PresentationLayer/efacec_projecto_00.aspx?idioma=1&area=2&competenciaid=0&projectoid=144) – *Central de Ondas Porto Cachorro, Ilha do Pico*, em Novembro de 2011.
- [45] Website: [http://www.nrel.gov/learning/re\\_basics.html](http://www.nrel.gov/learning/re_basics.html) - *Renewable Energy Basics*, em Novembro de 2011.
- [46] Website: <http://www.pvsyst.com/en/software/screenshots> - *PVsyst Screenshots*, em Março de 2012.
- [47] WITTKOPF, S.; VALLIAPPAN, S.; LIU, L.; ANG, K.; CHENG, S. – *Analytical performance monitoring a 142.5 kW<sub>p</sub> grid-connected rooftop BIPV system in Singapore*. *Renewable Energy* 47, págs. 9-20, Elsevier, 2012.

## **ANEXO I**

### **CÁLCULOS DE VERIFICAÇÃO DE ARRANJO FOTOVOLTAICO**

---



De modo a verificar as condições dos arranjos fotovoltaicos é necessário efectuar os cálculos seguintes.

No caso do módulo apresentado na figura 4.11:

Fluitemnik FTS280P possui:

- Potência = 280 Wp
- $V_{mpp} = 29.1 \text{ V}$
- $V_{oc} = 49.7 \text{ V}$

O arranjo sugerido pelo PVsyst consiste em 7 módulos em série e 2 séries em paralelo como indica a figura seguinte:

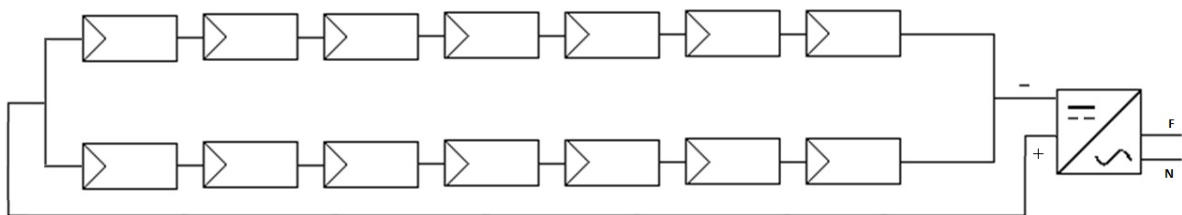


Figura I.1: Esquema exemplificativo de um sistema de sete módulos em série e duas séries em paralelo

As condições de operação do arranjo fotovoltaico são as seguintes

- $V_{mpp} = 29.1 \times 7 = 203 \text{ V} > 200 \text{ V} \Rightarrow \text{Verifica}$
- $V_{oc} = 49.7 \times 7 = 348 \text{ V} < 400 \text{ V} \Rightarrow \text{Verifica}$
- $P_{mpp} = 280 \times 14 = 3920 \text{ Wp}$

Uma vez que se consideram 10% de perdas relativamente às condições STC:

- $P_{mpp}(\text{operação}) = 3920 \times 0.90 = 3.5 \text{ kWp} < 3.68 \text{ kWp} \Rightarrow \text{Verifica}$

Logo, feitas estas verificações o arranjo fotovoltaico pode ser utilizado com o inversor escolhido.

---

## **ANEXO II**

### **QUADROS RESUMO DAS PERDAS DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS QUADROS COM OS VALORES DETALHADOS DAS COMPARAÇÕES NECESSIDADES VERSUS PRODUÇÃO**

---

Nos quadros II.1 e II.2 são apresentados os valores de perdas contabilizadas existentes nos sistemas fotovoltaicos simulados. Apenas são apresentados os valores de Faro e Porto para cada solução fotovoltaica por estes se tratarem das situações extremas de maior e menor produção respectivamente.

Quadro II.1: Valores das perdas existentes nos sistemas fotovoltaicos monocristalinos [28]

Tipos de Perdas ou Ganhos (%)	Monocristalino							
	Fluitemik		Open Renewables		GooSun		Yohkon Energia	
	FTS 250M		Open 250-ME60		GooSun 230M		YE6 220M-245	
	Faro	Porto	Faro	Porto	Faro	Porto	Faro	Porto
Global incident in collector plane	9,8	10,1	9,8	10,1	9,8	10,1	9,8	10,1
Near Shading Factor	-1,9	-2,2	-1,9	-2,2	-2,4	-2,8	-2,0	-2,3
IAM factor on global	-2,8	-2,9	-2,8	-2,9	-2,8	-2,9	-2,8	-2,9
PV loss due to irradiance level	-3,7	-4,6	-3,9	-4,9	-2,2	-2,9	-3,8	-4,7
PV loss due to temperature	-5,6	-3,5	-5,6	-3,6	-5,5	-3,5	-5,6	-3,6
Module quality loss	-1,6	-1,6	-1,3	-1,3	-1,3	-1,3	-1,6	-1,6
Module array mismatch loss	-2,1	-2,1	-2,1	-2,1	-2,1	-2,1	-2,1	-2,1
Ohmic wiring loss	-0,5	-0,4	-0,5	-0,4	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3
Inverter loss during operation	-5,1	-5,3	-5,1	-5,3	-5,1	-5,2	-5,1	-5,3
Total loss	-13,5	-12,5	-13,4	-12,6	-11,9	-10,9	-13,5	-12,7

Quadro II.2: Valores das perdas existentes nos sistemas fotovoltaicos policristalinos [28]

Tipos de Perdas ou Ganhos (%)	Policristalino									
	Martifer Solar		Fluiteknic		Open Renewables		GooSun		Yohkon Energia	
	MTS 230P		FTS 280P		Open 245-PC60		GooSun 230P		YE6 220P-235	
	Faro	Porto	Faro	Porto	Faro	Porto	Faro	Porto	Faro	Porto
Global incident in collector plane	9,8	10,1	9,8	10,1	9,8	10,1	9,8	10,1	9,8	10,1
Near Shading Factor	-2,3	-2,6	-2,1	-2,4	-1,9	-2,2	-2,4	-2,8	-2,0	-2,3
IAM factor on global	-2,8	-2,9	-2,8	-2,9	-2,8	-2,9	-2,8	-2,9	-2,8	-2,9
PV loss due to irradiance level	-2,9	-3,7	-2,5	-3,2	-3,3	-4,2	-4,1	-5,1	-4,1	-5,2
PV loss due to temperature	-6,5	-4,2	-5,9	-3,8	-5,5	-3,5	-6,1	-3,9	-5,5	-3,5
Module quality loss	-1,6	-1,6	-3,1	-3,2	-3,2	-3,2	-3,2	-3,2	-1,6	-1,6
Module array mismatch loss	-2,1	-2,1	-2,1	-2,1	-2,1	-2,1	-2,2	-2,2	-2,2	-2,2
Ohmic wiring loss	-0,3	-0,3	-0,5	-0,4	-0,5	-0,5	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3
Inverter loss during operation	-5,1	-5,2	-5,1	-5,3	-5,1	-5,3	-5,1	-5,3	-5,1	-5,3
Total loss	-13,8	-12,5	-14,3	-13,2	-14,6	-13,8	-16,4	-15,6	-13,8	-13,2

Em ambos os quadros anteriormente apresentados todos os valores são em percentagem sendo os valores negativos referentes a perdas e os positivos referentes a ganhos. Evidenciadas pela cor cinzenta estão as perdas totais obtidas pelo somatório de todos os valores de perdas e ganhos, as perdas devido à temperatura e os ganhos devido à incidência global sobre o plano do módulo fotovoltaico. Estas perdas e ganhos encontram-se destacados do resto das perdas por forma a uma mais fácil percepção de onde ocorrem as maiores diferenças entre localidades e sistemas fotovoltaicos.

No quadro III.3 são apresentados os valores de necessidades totais de energia final sem contabilização da energia produzida pelo colector solar e os valores de produção fotovoltaica por metro quadrado de pavimento utilizados na comparação efectuada na figura 4.28.

Quadro II.3: Valores das necessidades totais de energia final sem colector solar e de produção fotovoltaica

<b>Local</b>	<b><math>N_{t1}^{1)}</math> (kWh/m<sup>2</sup>.ano)</b>	<b><math>E_{AC\_final}</math> (kWh/m<sup>2</sup>.ano)</b>
<b>Bragança</b>	111,26	79,63
<b>Évora</b>	97,20	89,80
<b>Faro</b>	92,96	90,19
<b>Lisboa</b>	94,63	86,39
<b>Porto</b>	94,69	76,34

<sup>1)</sup>necessidades totais de energia final sem contabilização da energia produzida pelo colector solar.

Apresentam-se no quadro II.4 os valores das necessidades totais de energia final tendo em conta a energia produzida pelo colector solar e os valores de produção fotovoltaica por metro quadrado de pavimento utilizados na comparação efectuada na figura 4.29.

Quadro II.4: Valores das necessidades totais de energia final com colector solar e de produção fotovoltaica

<b>Local</b>	<b><math>N_{t2}^{2)}</math> (kWh/m<sup>2</sup>.ano)</b>	<b><math>E_{AC\_final}</math> (kWh/m<sup>2</sup>.ano)</b>
<b>Bragança</b>	67,15	79,63
<b>Évora</b>	49,35	89,80
<b>Faro</b>	45,02	90,19
<b>Lisboa</b>	48,01	86,39
<b>Porto</b>	52,18	76,34

<sup>2)</sup>necessidades totais de energia final com contabilização da energia produzida pelo colector solar.

No quadro II.5 apresentam-se os valores das necessidades totais de energia primária com e sem consideração da energia produzida pelo colector solar, com o apoio ao sistema solar sendo feito através de electricidade ou a gás natural e a energia produzida pelo sistema fotovoltaico já ponderado com o factor de conversão em energia primária. Os valores apresentados neste quadro são os utilizados nas comparações apresentadas anteriormente nas figuras 4.30,4.31,4.32 e 4.33.

Quadro II.5: Valores das necessidades nominais de energia primária e de produção fotovoltaica equivalente em energia primária

Local	$N_{tp1}^{3)}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	$N_{tp2}^{4)}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	$N_{tp3}^{5)}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	$N_{tp4}^{6)}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	$E_{AC\_primário}^{7)}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)
<b>Bragança</b>	349,35	229,06	210,86	221,86	263,57
<b>Évora</b>	305,20	184,91	154,96	172,63	297,24
<b>Faro</b>	291,91	171,62	141,36	159,20	298,51
<b>Lisboa</b>	297,14	176,86	150,76	166,24	285,94
<b>Porto</b>	297,31	177,03	163,85	172,01	252,69

<sup>3)</sup>necessidades globais nominais de energia primária com preparação de AQS com uso de electricidade sem contabilização da energia produzida pelo colector solar;

<sup>4)</sup>necessidades globais nominais de energia primária com preparação de AQS com uso de gás natural sem contabilização da energia produzida pelo colector solar;

<sup>5)</sup>necessidades globais nominais de energia primária com preparação de AQS com uso de electricidade tendo em conta a energia produzida pelo colector solar;

<sup>6)</sup>necessidades globais nominais de energia primária com preparação de AQS com uso de gás natural tendo em conta a energia produzida pelo colector solar;

<sup>7)</sup>energia produzida pelo sistema fotovoltaico ponderado com o factor de conversão em energia primária.

No quadro II.6 apresentam-se os valores das necessidades totais de energia em emissões equivalentes de CO<sub>2</sub> com consideração da energia produzida pelo colector solar, com o apoio ao sistema solar sendo feito através de electricidade ou a gás natural e a energia produzida pelo sistema fotovoltaico já ponderado com o factor de conversão em emissões equivalentes de CO<sub>2</sub>. Os valores apresentados neste quadro são os utilizados nas comparações apresentadas anteriormente nas figuras 4.34 e 4.35.

Quadro II.6: Valores das necessidades nominais de energia em emissões de CO<sub>2</sub> e de produção fotovoltaica de energia em emissões de CO<sub>2</sub>

Local	$N_{tp5}^{8)}$ (kg/m <sup>2</sup> .ano)	$N_{tp6}^{9)}$ (kg/m <sup>2</sup> .ano)	$E_{AC\_CO_2}^{10)}$ (kg/m <sup>2</sup> .ano)
<b>Bragança</b>	41,43	44,20	49,13
<b>Évora</b>	30,45	34,49	55,41
<b>Faro</b>	27,78	31,85	55,64
<b>Lisboa</b>	29,62	33,25	53,30
<b>Porto</b>	32,20	34,42	47,10

<sup>8)</sup>necessidades globais nominais de energia em emissões de CO<sub>2</sub> com preparação de AQS com uso de electricidade tendo em conta a energia produzida pelo colector solar;

<sup>9)</sup>necessidades globais nominais de energia em emissões de CO<sub>2</sub> com preparação de AQS com uso de gás natural tendo em conta a energia produzida pelo colector solar;

<sup>10)</sup>energia produzida pelo sistema fotovoltaico ponderado com o factor de conversão em emissões equivalentes de CO<sub>2</sub>.



**ANEXO III**

**RELATÓRIOS DE SIMULAÇÃO DO PVSYST**

---